



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Fertigungs- und werkstofftechnische Konzeptionierung einer Circular Economy Strategie in der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

in der

Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

der Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von

Philipp Kronenberg, M.Sc.

aus Solingen

Wuppertal 2023

Dissertation eingereicht am: 25.01.2023

Tag der mündlichen Prüfung: 04.05.2023

Erster Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Sebastian Weber

Zweiter Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Arne Röttger

Danksagung

Aufgrund datenschutzrechtlicher Bestimmungen ist dieser Inhalt ausschließlich in der gedruckten Ausgabe verfügbar.

Kurzfassung

Die zunehmende Ressourcenknappheit und der damit einhergehende Klimawandel zwingen die Gesellschaft dazu, nachhaltiger zu wirtschaften. Die metallverarbeitende Industrie, insbesondere die Stahlindustrie, spielt eine wichtige Rolle in der globalen Wirtschaft. Laut der Internationalen Stahlvereinigung (World Steel Association) wurden im Jahr 2021 weltweit rund 1,9 Milliarden Tonnen Stahl produziert. In Deutschland, dem größten Stahlproduzenten in Europa, wurden im selben Jahr knapp 45 Millionen Tonnen Stahl hergestellt. Der hohe Ressourcenverbrauch und die damit einhergehenden CO₂-Emissionen bei der Stahlproduktion machen es notwendig, nachhaltigere Lösungen zu finden. Das Konzept der Kreislaufwirtschaft bietet dafür eine Möglichkeit, indem es den Ressourcenverbrauch minimiert und den Materialkreislauf in Unternehmen optimiert. Allerdings müssen für die Umsetzung in der Stahlindustrie fertigungs- und werkstofftechnische Herausforderungen gelöst werden. Daher ist es notwendig, diese Aspekte in der Konzeptionierung von Kreislaufwirtschaftskonzepten in der Stahlindustrie zu berücksichtigen.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Konzept der Kreislaufwirtschaft in der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie entwickelt, sodass die Verwendung von hochlegiertem Kaltarbeitsstahl intensiviert wird. Als Sekundärmaterial standen verschlissene Maschinenkreismesser aus dem Stahl X153CrMoV12 (1.2379) zur Verfügung. Während der Konzeptionierung wurde der gesamte Prozess von der Auswahl der 10R-Strategie über die Auswahl der Repurpose-Produkte und deren Fertigungsprozess bis hin zu anwendungsnahen Verschleißversuchen betrachtet.

Als Strategie für die Weiterverwendung des Stahls X153CrMoV12 (1.2379) wurde die Repurpose-Strategie verwendet. Bei der Repurpose-Strategie werden Baugruppen, Bauteile oder Materialien in einem neuen Produkt mit geänderter Funktion weiterverwendet. Die Auswahl der Repurpose-Produkte erfolgte anhand der vorliegenden Materialeigenschaften des Sekundärmaterials. Im Gegensatz zur Linearwirtschaft, in der Material anhand der Produkthanforderungen ausgewählt wird, erfolgt in einer Kreislaufwirtschaft die Produktauswahl anhand der bestehenden Materialeigenschaften. Da sich die Materialeigenschaften des Stahls X153CrMoV12 (1.2379) für Schneidwaren anbieten, wurden Pappreißmesser und Drechselmeißel als Repurpose-Produkte ausgewählt. Hierbei galt es ebenfalls, die Abmessungen des Sekundärmaterials und der Repurpose-Produkte zu berücksichtigen.

Um Rohlinge für die Repurpose-Produkte aus dem Sekundärmaterial zu entnehmen, mussten geeignete trennende Fertigungsverfahren gewählt werden. Hierbei hat sich gezeigt, dass das Laserschneiden ein geeignetes Verfahren ist, um aus den Maschinenkreismessern komplexe Geometrien zu entnehmen. Neben dem Laserschneiden wurde das Wasserstrahlabrasivschneiden verwendet, hierbei hat sich allerdings gezeigt, dass das Verfahren nicht geeignet ist. Durch die Wirkweise des Wasserstrahlschneidens und der Geometrie der Maschinenkreismesser sind diese während des Schneidprozesses gebrochen. Des Weiteren wurde gezeigt, dass bestehende Fertigungsverfahren der Linearwirtschaft für die Kreislaufwirtschaft angepasst und optimiert werden müssen. Versuche, bei denen die Laserschneidparameter kontinuierlich auf die vorliegende Materialstärke angepasst wurden, haben gezeigt, dass sich die Wärmeeinflusszone und die benötigte Zeit signifikant reduzieren. Durch die verringerte Wärmeeinflusszone muss bei der Herstellung der Repurpose-Werkzeuge weniger Material durch eine schleifende Bearbeitung abgetragen werden, was wiederum Ziel der Repurpose-Strategie ist.

Die Repurpose-Rohlinge sind anschließend in die Fertigungsroute der konventionellen Werkzeuge integriert worden. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die Verwendung von Sekundärmaterial sowohl positive als auch negative Einflüsse auf die Fertigungsroute haben kann. Durch die Verwendung des bereits wärmebehandelten Sekundärmaterials konnten bei der Herstellung der Drechselmeißel die energieintensiven Wärmebehandlungsprozesse eingespart werden. Da das Sekundärmaterial bereits eine entsprechende Oberflächenqualität aufwies, konnte der Materialabtrag durch Schleifen signifikant reduziert werden. Bei der Herstellung der Hakenklingen für die Pappreißmesser hat sich der Schleifaufwand erhöht, da das Sekundärmaterial eine deutlich höhere Verschleißbeständigkeit aufweist als der Stahl der konventionellen Hakenklingen.

Bei den anwendungsnahen Verschleißversuchen konnte gezeigt werden, dass die Repurpose-Werkzeuge eine signifikant längere Standzeit gegenüber den konventionellen Werkzeugen aufweisen. Da der Stahl X153CrMoV12 (1.2379) gegenüber den verwendeten Stählen der konventionellen Werkzeuge eine höhere Verschleißbeständigkeit aufweist, was ebenfalls in standardisierten Einzelritzversuchen nachgewiesen werden konnte, wurde die Standzeit zum Teil um den Faktor 6 verlängert. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die im Sekundärmaterial enthaltene Karbidzeiligkeit quer zur angreifenden Schneide vorliegen sollte. Hierdurch sind die Karbide vom Typ M_7C_3 besser in der Matrix eingebunden. Neben der besseren Einbindung in der Matrix konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass die Karbidzeiligkeit die Wärmeleitfähigkeit von Stählen beeinflusst. Verläuft die Karbidzeiligkeit parallel mit dem Wärmestrom, konnte eine verbesserte Leitfähigkeit gemessen werden. Eine schnellere Wärmeabfuhr kann zu einer längeren Standzeit von Werkzeugen beitragen.

Neben den notwendigen Optimierungen für den Laserschneidprozess im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft konnte gezeigt werden, dass auch bestehende Nestingverfahren für eine Repurpose-Strategie erweitert werden müssen. Durch das Einbeziehen von Nebenbedingungen, die die Nachhaltigkeit der

folgenden Fertigungsverfahren mit in das Nesting einbeziehen, konnte der Energieverbrauch für die Herstellung der Repurpose-Werkzeuge reduziert werden.

Die in dieser Arbeit erhobenen Ergebnisse können auch in einer Linearwirtschaft angewendet werden, sodass diese nachhaltiger gestaltet werden kann. Die Verschleißversuche der Drechselmeißel zeigen, dass der Kaltarbeitsstahl X153CrMoV12 (1.2379) eine längere Standzeit aufweist als der High-Performance-Drechselmeißel aus dem Schnellarbeitsstahl HS6-5-2C (1.3343). Der Schnellarbeitsstahl benötigt jedoch deutlich mehr Ressourcen bei seiner Herstellung. Bei der Materialauswahl im Produktentwicklungsprozess müssen demnach die erreichbaren Standzeiten und der Energieaufwand für die Materialien mitberücksichtigt werden.

Abstract

The increasing shortage of resources and the associated climate change are forcing society to operate more sustainably. The metalworking industry, in particular the steel industry, has an important impact on the global economy. According to the World Steel Association, around 1.9 billion tons of steel were produced worldwide in 2021. In Germany, the largest steel producer in Europe, almost 45 million tons of steel were produced in the same year. The high amount of resources used and the associated CO₂ emissions in steel production make it necessary to develop more sustainable solutions. The circular economy concept offers one way of doing this by minimizing resource consumption and optimizing the material cycle in all companies. For the implementation in the steel industry, manufacturing and material challenges have to be solved. It is necessary to take these aspects into account when conceptualizing circular economy concepts in the steel industry.

In the present work, a circular economy concept was developed in the tool and cutlery industry to intensify the use of high-alloy cold-work tool steel. Worn machine circular knives made of X153CrMoV12 (1.2379) steel were used as secondary material. During the conceptual development, the entire process was considered, from the selection of the 10R strategy to the selection of the repurpose products and their manufacturing process to application-related wear tests.

The strategy that was used for the use of the X153CrMoV12 (1.2379) steel was the repurpose strategy. In the repurpose strategy, assemblies, components, or materials are reused in a new product with a modified function. Repurpose products were selected based on the available material properties of the secondary material. In contrast to a linear economy in which materials are selected based on product requirements, the selection of products in a circular economy is based on existing material properties. Since the material properties of the steel X153CrMoV12 (1.2379) are ideal for cutting products, paper-cutting knives and turning chisels were selected as repurposed products. The dimensions of the secondary material and the repurpose products also had to be taken into account.

In order to cut blanks for the Repurpose products from the secondary material, it was necessary to select suitable cutting production processes. Laser cutting was found as a suitable cutting process for extracting complex geometries from circular knives. In addition to laser cutting, abrasive waterjet cutting was also used, but this process proved unsuitable. Due to the impact of waterjet cutting and the

geometry of the machine's circular knives, these are broken during the cutting process. Furthermore, it was shown that existing manufacturing processes of the linear economy have to be adapted and optimized for the circular economy. Experiments in which the laser cutting parameters were continuously adjusted to the material thickness have shown that the heat-affected zone and the time to cut are significantly reduced. The reduced heat-affected zone means that less material has to be removed by grinding during the production of the Repurpose tools, which in turn is the aim of the Repurpose strategy.

The Repurpose blanks have subsequently been integrated into the production route of the conventional tools. It was noted that the use of secondary material can have both positive and negative effects on the production route. By using the already heat-treated secondary material, the energy-intensive heat treatment processes could be saved in the production of the turning tools. Since the secondary material already had an appropriate surface quality, material removal by grinding could be significantly reduced. In the manufacture of the hook blades for the paper cutting knives, the grinding effort increased because the secondary material has a significantly higher wear resistance than the steel of the conventional hook blades.

In the wear tests close to the application, it was shown that the Repurpose tools have a significantly longer service life compared to the conventional tools. Since the steel X153CrMoV12 (1.2379) has a higher wear resistance than the steels used in the conventional tools, which was also demonstrated in standardized individual scratch tests, the service life was extended by a factor of 6 in some cases. In addition, it was shown that the carbides contained in the secondary material should be present at right angles to the attacking cutting edge. As a result, the carbides of the M_7C_3 type are better embedded in the matrix. In addition to the better embedding in the matrix, it could also be shown that the carbide orientation influences the thermal conductivity of steels. If the carbide thickness runs parallel with the heat flow, improved conductivity could be measured. Faster heat dissipation can contribute to a longer tool life.

In addition to the necessary optimizations for the laser cutting process in the context of a circular economy, it could be shown that existing nesting processes also need to be extended for a repurpose strategy. By incorporating constraints that include the sustainability of the following manufacturing processes into the nesting, the energy consumption for the production of the repurpose tools could be reduced. The results collected in this work can also be applied in a linear economy so that it can be made more sustainable. The wear tests of the turning tools show that the cold-work steel X153CrMoV12 (1.2379) has a longer tool life than the high-performance turning tool made of high-speed steel HS6-5-2C (1.3343). However, high-speed steel requires significantly more resources for its production. When selecting materials in the product development process, the achievable tool life and the energy required for the materials must therefore also be taken into account.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Nomenklatur | XIII |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation | 1 |
| 1.2 Ziel und Weg | 3 |
| 2 Grundlagen | 5 |
| 2.1 Kreislaufwirtschaft | 5 |
| 2.1.1 Die 10 R's | 6 |
| 2.2 Werkzeugstähle | 8 |
| 2.2.1 Kaltarbeitsstähle | 9 |
| 2.2.2 Schnellarbeitsstähle | 11 |
| 2.3 Nesting | 12 |
| 2.3.1 Eindimensionales Nesting | 13 |
| 2.3.2 Zweidimensionales Nesting | 14 |
| 2.3.3 Dreidimensionales Nesting | 15 |
| 2.4 Trennende Fertigungsverfahren | 16 |
| 2.4.1 Zerteilen | 16 |
| 2.4.2 Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide | 17 |
| 2.4.3 Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide | 17 |
| 2.4.4 Abtragen | 18 |
| 2.4.5 Zerlegen | 20 |
| 2.5 Eigenspannungen | 21 |
| 2.5.1 Das Spannen von scheibenförmigen Werkzeugen | 22 |
| 2.6 Verschleiß | 23 |
| 2.6.1 Verschleißarten | 24 |
| 2.6.2 Verschleißmechanismen | 26 |
| 2.6.3 Verschleißbeständigkeit gegen Abrasion | 28 |
| 2.7 Wärmeleitfähigkeit von Metallen | 30 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.7.1 | Wärmeleitfähigkeit in technischen Prozessen | 31 |
| 3 | Versuchsdurchführung | 33 |
| 3.1 | Thermodynamische Gleichgewichtsberechnungen | 33 |
| 3.2 | Chemische Analyse | 33 |
| 3.3 | Proben- und Halbzeugentnahme | 33 |
| 3.3.1 | Wasserstrahlschneiden | 34 |
| 3.3.2 | Laserschneiden | 34 |
| 3.4 | Metallographie | 34 |
| 3.4.1 | Stationäre Metallographie | 34 |
| 3.4.2 | Vor-Ort-Metallographie | 35 |
| 3.4.3 | Elektrolytisches Abtragen | 36 |
| 3.5 | Bildgebende Verfahren | 36 |
| 3.5.1 | Stereomikroskopie | 36 |
| 3.5.2 | Lichtmikroskopie | 36 |
| 3.5.3 | Rasterelektronenmikroskopie | 36 |
| 3.5.4 | Konfokales Laserrastermikroskop | 37 |
| 3.5.5 | Quantitative Bildanalyse | 37 |
| 3.6 | Phasenanalyse | 37 |
| 3.6.1 | Röntgendiffraktometrie | 37 |
| 3.6.2 | Energiedispersive Röntgenanalyse | 38 |
| 3.7 | Mechanische Eigenschaften | 38 |
| 3.7.1 | Schlagbiegeversuche | 38 |
| 3.7.2 | Härtemessungen | 38 |
| 3.7.3 | Eigenspannungsmessungen | 39 |
| 3.8 | Tribologische Untersuchungen | 39 |
| 3.8.1 | Ritzversuch | 39 |
| 3.8.2 | Drechselversuch | 40 |
| 3.8.3 | Schneidleistungstest | 42 |
| 3.9 | Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit | 43 |
| 3.9.1 | Messung der Dichte | 44 |
| 3.9.2 | Messung der Temperaturleitfähigkeit | 44 |
| 3.9.3 | Messung der spezifischen Wärmekapazität | 45 |
| 3.9.4 | Messung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten | 45 |
| 3.10 | Messung des spezifischen elektrischen Widerstandes und des Seebeck-Koeffizienten . . | 46 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.11 | Erstellung von Anlassdiagrammen | 46 |
| 3.12 | Gewichtsmessungen | 46 |
| 3.13 | Computer-Aided Design | 47 |
| 3.13.1 | Nesting | 47 |
| 3.13.2 | Finite Elemente Berechnung | 47 |
| 3.14 | Analyse der Umweltleistung | 48 |
| 4 | Ergebnisse | 51 |
| 4.1 | Verwendete Werkstoffe | 51 |
| 4.1.1 | 75Cr1 (1.2003) | 51 |
| 4.1.2 | 80CrV2 (1.2235) | 51 |
| 4.1.3 | HS6-5-2C (1.3343) | 52 |
| 4.1.4 | X153CrMoV12 (1.2379) | 53 |
| 4.2 | Verwendete konventionelle Werkzeuge | 53 |
| 4.2.1 | Maschinenkreismesser | 54 |
| 4.2.2 | Drehsselwerkzeug | 54 |
| 4.2.3 | Pappreißmesser | 55 |
| 4.3 | Nesting | 56 |
| 4.4 | Vor-Ort Metallographie | 57 |
| 4.5 | Halbzeugherstellung | 57 |
| 4.5.1 | Wasserstrahlschneiden | 58 |
| 4.5.2 | Laserschneiden | 59 |
| 4.6 | Fertigung der Repurpose Werkzeuge | 61 |
| 4.6.1 | Repurpose-Drehsselmeißel | 61 |
| 4.6.2 | Repurpose-Pappreißmesser | 61 |
| 4.7 | Tribologische Untersuchungen | 62 |
| 4.7.1 | Ritzversuch | 62 |
| 4.7.2 | Drehsselversuche | 68 |
| 4.7.3 | Schneidleistungstest | 73 |
| 4.8 | Wärmeleitfähigkeit und spezifischer elektrischer Widerstand | 76 |
| 4.9 | Härte-Anlassdiagramme | 78 |
| 4.10 | Auswirkung auf die Umweltleistung | 78 |
| 4.10.1 | Auswirkungen von Nebenbedingungen während des Nestings | 78 |
| 4.10.2 | Auswirkung einer in-situ Laserleistungsanpassung auf die WEZ und deren Nach- bearbeitung | 79 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.10.3 | Auswirkung der Repurpose-Strategie auf den Schleifprozess | 79 |
| 5 | Diskussion | 81 |
| 5.1 | Konzeptionierung eines Circular Economy Konzepts | 81 |
| 5.1.1 | Berücksichtigung des Sekundärmaterials für mögliche Repurpose-Produkte . . . | 83 |
| 5.1.2 | Trennende Fertigungsverfahren in der Repurpose-Strategie | 85 |
| 5.1.3 | Einfluss des Sekundärmaterials auf den Fertigungsprozess der Repurpose-Werkzeuge | 91 |
| 5.2 | Herausforderungen bestehender Fertigungstechnologien zur Umsetzung einer Repurpose-Strategie | 95 |
| 5.2.1 | Erweiterung von Nesting-Verfahren mit Nebenbedingungen zur Steigerung der Ressourceneffizienz | 96 |
| 5.2.2 | Möglichkeit der In-situ Lasersteuerung zur Effizienzsteigerung während des Laserschneidprozesses | 99 |
| 5.3 | Einfluss der Repurpose-Strategie auf den Lebenszyklus von Werkzeugen bei Raumtemperatur | 104 |
| 5.3.1 | Einfluss des Sekundärmaterials auf die Gebrauchseigenschaften der Hakenklingen | 104 |
| 5.3.2 | Einfluss des Sekundärmaterials auf die Verschleißbeständigkeit der Hakenklingen | 107 |
| 5.3.3 | Analyse der Standzeit auf die Umweltleistung der Pappreißmesser | 111 |
| 5.4 | Einfluss des Sekundärmaterials auf den Lebenszyklus von Werkzeugen im Einsatz bei erhöhten Temperaturen | 112 |
| 5.4.1 | Einfluss des Sekundärmaterials auf das Verschleißverhalten der Drechselmeißel | 113 |
| 5.4.2 | Einfluss des Sekundärmaterials auf die Verschleißbeständigkeit der Drechselmeißel | 116 |
| 5.4.3 | Analyse der Standzeit auf die Umweltleistung der Drechselmeißel | 123 |
| 5.5 | Materialauswahl bei Werkzeugen unter Berücksichtigung von Zielen der Circular Economy | 125 |
| 5.6 | Bewertung der Repurpose-Strategie auf die Umweltleistung | 128 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick | 133 |
| | Tabellen | 141 |
| | Abbildungen | 157 |
| | Literaturverzeichnis | 241 |

Nomenklatur

Symbole

| | | |
|----------------------|--|---------------------------------|
| A | Fläche | m^2 |
| $A_1 + A_2$ | Querschnittsfläche der Ritzfurchenaufwerfungen | mm^2 |
| A_V | Querschnittsfläche der Ritzfurche | m^2 |
| α | Temperaturleitfähigkeit | $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ |
| α_{th} | Thermischer Ausdehnungskoeffizient | $1/\text{K}$ |
| β | Schneidenwinkel | $^\circ$ |
| β | Volumenausdehnungskoeffizient | $1/\text{K}$ |
| C_p | isobare Wärmekapazität | J K^{-1} |
| c_p | spezifische isobare Wärmekapazität | $\text{J g}^{-1} \text{K}^{-1}$ |
| C_v | isochore Wärmekapazität | J K^{-1} |
| d | Diagonale der Härteeindrücke | μm |
| d | Schneidendicke | μm |
| Δl | Ausdehnung | μm |
| ΔT | Temperaturdifferenz | K |
| F | Kraft | N |
| F_0 | Vorkraft | N |
| F_N | Normalkraft | N |
| F_S | Schneidkraft | N |
| $F_{S\text{max}}$ | maximale Schneidkraft | N |
| F_T | Querkraft | N |
| h | Eindringtiefe | mm |
| I | Stromstärke | A |
| k_s | Schneidwiderstand | N mm^{-2} |
| l | Weglänge | m |
| L | Lorenz-Zahl | $\text{V}^2 \text{K}^{-2}$ |
| l_0 | Ausgangslänge | μm |

| | | |
|------------------|--------------------------------------|-------------------|
| L_0 | Sommerfeldkonstante der Lorenz-Zahl | $V^2 K^{-2}$ |
| l_s | Schnittlänge | mm |
| λ | Wärmeleitfähigkeit | $W m^{-1} K^{-1}$ |
| λ_e | Elektronische Wärmeleitfähigkeit | $W m^{-1} K^{-1}$ |
| λ_m | Magnonische Wärmeleitfähigkeit | $W m^{-1} K^{-1}$ |
| λ_p | Phononische Wärmeleitfähigkeit | $W m^{-1} K^{-1}$ |
| m | Masse | kg |
| m_F | Masse in Ethanol | kg |
| m_L | Masse an der Luft | kg |
| M_f | Martensitfinish-Temperatur | $^{\circ}C$ |
| M_s | Martensitstart-Temperatur | $^{\circ}C$ |
| n | Stoffmenge | mol |
| p | Druck | Pa |
| p_u | Umgebungsdruck | Pa |
| R_m | Zugfestigkeit | MPa |
| ρ | Spezifischer elektrischer Widerstand | Ωm |
| ρ_F | Dichte des Ethanols | $kg m^{-3}$ |
| ρ_m | Massendichte | $kg m^{-3}$ |
| RT | Raumtemperatur | $^{\circ}C$ |
| S | Seebeck-Koeffizient | $V K^{-1}$ |
| s_0 | Blechstärke | mm |
| σ | Elektrische Leitfähigkeit | $q/\Omega/m$ |
| σ | Normalspannung | $N mm^{-2}$ |
| σ_{ES} | Eigenspannungen | MPa |
| σ_{ESI} | Eigenspannungen I.-Art | MPa |
| σ_{ESII} | Eigenspannungen II.-Art | MPa |
| σ_{ESIII} | Eigenspannungen III.-Art | MPa |
| T | Temperatur | $^{\circ}C$ |
| t | Zeit | s |

Abkürzungen

| | |
|-----------|-----------------|
| 3D | Dreidimensional |
| Al_2O_3 | Aluminiumoxid |

| | |
|---------------------|---|
| AM | additive manufacturing |
| At.-% | Atom-% |
| B ₄ C | Borcarbid |
| BN | Bornitrid |
| BPP | Bin Packing Problem |
| BSE | Rückstreu-Elektronen (Back scattering electrons) |
| CAD | computer-aided design |
| CALPHAD | CALculation of PHASe Diagrams |
| CE | Circular Economy |
| CES | Cambridge Engineering Selector |
| CO ₂ | Kohlenstoffdioxid |
| CO ₂ -eq | Kohlenstoffdioxid-Äquivalent |
| COF | Reibungskoeffizient |
| COF | Reibungskoeffizienten |
| CSP | Cutting Stock Problem |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |
| DSC | Differential Scanning Calorimetry |
| DXF | Drawing Interchange File Format |
| EC | Elektrochemisch |
| E-Commerce | elektronischer Handel |
| EDX | Energiedispersive Röntgenspektrometrie (Energy-dispersive X-Ray spectrometry) |
| ELF | Elektrische Leitfähigkeit |
| EM | Energiemix |
| EoL | End-of-Life-Strategie |
| ES | Energie für das Schleifen |
| f _{ab} | Kennwert zur Beurteilung der Mikromechanismen der Abrasion |
| FEM | Finite-Elemente-Methode |
| H ₂ O | Wasser |
| HNO ₃ | Salpetersäure |
| HRC | Härte nach Rockwell |
| HSS | High Speed Steels |
| HV | Härte nach Vickers |
| IIPP | Identical Item Packing Problem |
| ISO | Internationale Organisation für Normung |
| KAS | Kaltarbeitsstähle |

| | |
|-------------------------|--|
| KP | Knapsack Problem |
| LAS | Leica Application Suite |
| LiMi | Auflichtmikroskop |
| Ma.-% | Masseprozent |
| NH ₄ CL | Ammoniumchlorid |
| NP | nichtdeterministisch polynomielle Zeit |
| ODP | Open Dimension Problem |
| OES | Optische Emissionsspektrometrie |
| PP | Placement Problem |
| RE | Recycling |
| REM | Rasterelektronenmikroskop |
| ReM | Rohlinge für Repurpose-Werkzeuge |
| RM | Material für das Recycling |
| RT | Raumtemperatur |
| SAS | Schnellarbeitsstähle |
| SE | Sekundär-Elektron |
| SiC | Siliziumkarbid |
| SM _{Fertigung} | Zu schleifende Materialmengen |
| SM _{Laser} | Zu schleifende Materialgewicht |
| SM _{Nesting} | Gewichtsdifferenz Repurpose-Rohling zu fertigem konventionellem Werkzeug |
| TC | Thermo-Calc |
| THG | Treibhausgasemissionen |
| Vol.-% | Volumenprozent |
| WAS | Warmarbeitsstähle |
| WEZ | Wärmeeinflusszone |
| WLF | Wärmeleitfähigkeit |
| XRD | X-ray Diffraction |

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Gesellschaft steht vor der Herausforderung, nachhaltiger zu wirtschaften, da die verfügbaren Ressourcen immer knapper werden. Im Jahr 2022 hat die Menschheit die Ressourcen, die die Natur in einem Jahr wiederherstellen kann, in nur sieben Monaten aufgebraucht. Anhand des globalen ökologischen Fußabdrucks der Menschheit hat die Organisation Global Footprint Network den Earth Overshoot Day für den 28. Juli berechnet. Der ökologische Fußabdruck ist ein Indikator, der den Verbrauch von Ressourcen und die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf die Umwelt beschreibt. Diesem Indikator zufolge lebt die Weltbevölkerung derzeit so, als ob sie 1,75 Erden zur Verfügung hätte [1]. Die meisten Aktivitäten und Produkte der modernen Gesellschaft sind auf Ressourcen angewiesen. Die Ressourcenextraktion hat sich in den letzten fünf Jahrzehnten mehr als verdreifacht und trägt erheblich zum globalen Klimawandel bei [2]. Mit der ständig steigenden Nachfrage nach Ressourcen für verschiedene Güter gelingt es dem anthropogenen Stoffwechsel jedoch nicht, die Umweltauswirkungen der Materialproduktion für wirtschaftliche Aktivitäten innerhalb der planetarischen Grenzen zu begrenzen [3–5]. Durch den Klimawandel, die Treibhausgasemissionen, die Bodendegradation, den Verlust der biologischen Vielfalt, den Ressourcenverbrauch und viele andere Aspekte sind die Zunahme der globalen Umweltprobleme miteinander verknüpft. Die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs bzw. eine umfassende Ressourcenschonung und die damit verbundenen Umweltauswirkungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette können als wesentliche Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung angesehen werden [6, 7].

Die drastische Reduzierung der Treibhausgasemissionen stellt Industrieländer wie die Bundesrepublik Deutschland vor große Herausforderungen, da sie einen gesellschaftlichen und technologischen Wandel erfordert [8, 9]. Ein Konzept, das dabei helfen kann, ist die Kreislaufwirtschaft auch circular economy (CE) genannt. Die Kreislaufwirtschaft zielt darauf ab, Materialien und Ressourcen so lange wie möglich in wertschöpfenden Prozessen zu nutzen und Abfälle zu vermeiden oder zu minimieren [10–12]. Im Mittelpunkt von CE steht das Ziel, den Materialkreislauf zu schließen und gleichzeitig die Produktintegrität durch Prinzipien der Lebensverlängerung wie Wiederverwendung oder Wiederherstellung in weiteren Zyklen zu erhalten [13, 14]. Die metallverarbeitende Industrie spielt dabei eine wichtige

Rolle, da sie über ein hohes Potenzial zur Ressourceneinsparung und Abfallvermeidung verfügt. Die Nachfrage nach Stahl steigt stetig, sodass im Jahr 2019 weltweit 1.869 Millionen Tonnen Rohstahl erzeugt wurden [15]. 39,7 Millionen Tonnen entfallen dabei auf die Produktion in Deutschland [15]. Dies geht mit enormen Umweltauswirkungen einher. Insgesamt wurden im Jahr 2016 7,2 Prozent der globalen Treibhausgasemissionen direkt auf den Energiebedarf der Eisen- und Stahlindustrie zurückgeführt, was einer Menge von insgesamt 3 600 000 000 t CO₂-eq entspricht [16, 17]. In Deutschland wurde im Jahr 2018 allein durch die Rohstahlerzeugung 4 040 000 t CO₂-eq ausgestoßen [18]. Die Kreislaufwirtschaft in der metallverarbeitenden Industrie bezieht sich auf das Konzept, Rohstoffe so lange wie möglich im produktiven Nutzungskreislauf zu halten, um den Rohstoffverbrauch zu minimieren und die Ressourceneffizienz zu erhöhen. Dies kann durch die Wiederverwendung von metallischen Abfällen und die Verwendung von recycelten Materialien erreicht werden. Derzeit ist Recycling die am häufigsten angewendete Strategie in verschiedenen CE-Konzepten [12]. So kann das Recycling von Stahl eine wichtige Rolle bei der Verringerung der CO₂-Emissionen spielen. Metalle eignen sich besonders gut für das Recyclen, da sie nahezu unbegrenzt recycelt werden können, solange genügend Energie vorhanden ist [19]. Im Sinne des nachhaltigen Produzierens ist das Recycling von Metallen besser als die Primärproduktion [20], da die energieintensive Reduktion des Erzes vermieden wird [21]. Andere Materialien, die in die Schmelze gelangen, verunreinigen den Stahl und Verluste sowie Verunreinigungen resultieren aus den verbleibenden unvollkommenen legierungsspezifischen Sortier-, Recycling- und Verarbeitungsausbeuten. Es ist ein kontinuierlicher Bedarf an Primärmaterial erforderlich, um dissipative Verluste zu kompensieren und die Schmelze entsprechend der gewünschten Legierungszusammensetzung aufgrund von Verunreinigungen anzupassen [22–24]. Auch wenn es durch die Verbesserung des Recyclingsystems noch ökologische Einsparpotenziale gibt, reichen diese nicht aus, um die Klimaziele zu erreichen und den Stahlbedarf auch in Zukunft zu decken [25]. Deshalb sollten vor dem Recycling andere Strategien angewendet werden, die eine bessere Energie- und Materialeffizienz aufweisen [13]. Durch die Verlängerung der Lebensdauer eines Materials werden Produkte zu neuen Produkten und die Abfallmenge wird reduziert [26]. Neben den positiven Auswirkungen auf die Umwelt kann die Einführung von Kreislaufwirtschaftssystemen in der metallverarbeitenden Industrie auch wirtschaftliche Vorteile bringen. Durch die Verwendung von recycelten Materialien können die Kosten gesenkt werden, da diese in der Regel billiger sind als Rohmaterialien. Darüber hinaus kann die Verwendung von Sekundärmaterial die Abhängigkeit von Rohstoffimporten verringern [27].

Studien zum Stand der Technik bei der Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien haben gezeigt, dass diese noch am Anfang stehen [28]. Unternehmen werden beim Übergang von einer Linearwirtschaft zu einer Kreislaufwirtschaft mit verschiedenen organisatorischen, technischen, finanziellen und marktbezogenen Herausforderungen und Hindernissen konfrontiert [29]. In der metallverarbeitenden Industrie sind noch viele unbeantwortete Fragen zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft offen. Dazu

gehört zum Beispiel die Frage, wie Materialien am besten weiterverwendet, wiederaufbereitet und recycelt werden können. Auch fertigungs- und werkstofftechnische Aspekte müssen berücksichtigt werden, um sicherzustellen, dass die Qualität der Produkte und Materialien den Anforderungen der Industrie entspricht. Insgesamt ist die Einführung der Kreislaufwirtschaft in der metallverarbeitenden Industrie eine komplexe Aufgabe, bei der viele verschiedene Aspekte berücksichtigt werden müssen.

Einzelfallstudien für Stahlprodukte haben für die Einführung von Kreislaufwirtschaftsstrategien eine hohe Bedeutung, um wertvolle Erkenntnisse für diese Branche zu liefern. Die Anwendung von weiteren Materialeffizienzmaßnahmen ist stark produktbezogen [30]. Die Werkzeug- und Schneidwarenindustrie ist ein wichtiger Sektor, der für die Herstellung von Werkzeugen und Schneidinstrumenten benötigt wird. Allerdings ist diese Branche auch für einen hohen Ressourcenverbrauch und eine hohe Abfallproduktion verantwortlich. Um nachhaltige Geschäftspraktiken zu fördern und Ressourcen zu schonen, bietet sich das Konzept der Kreislaufwirtschaft in der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie an. Für die Gebrauchseigenschaften der Werkzeuge spielen die Materialeigenschaften eine entscheidende Rolle, sodass diese bei der Einführung von Kreislaufwirtschaftsstrategien berücksichtigt werden müssen. Die zuvor angesprochenen offenen Fragen und die benötigten Fallbeispiele an realen Produkten verdeutlichen die Relevanz der vorliegenden Arbeit.

1.2 Ziel und Weg

Das übergeordnete Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist die Konzeptionierung einer Circular Economy Strategie in der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie. Der Fokus liegt dabei auf hochlegiertem Werkzeugstahl, der als Sekundärmaterial dient, wobei die fertigungs- und werkstofftechnischen Herausforderungen analysiert und diskutiert werden.

Um das Ziel zu erreichen, wird im ersten Schritt das vorhandene Sekundärmaterial charakterisiert. Dieses liegt in Form von verschlissenen Maschinenkreismessern vor. Charakterisiert werden die Materialeigenschaften des Sekundärmaterials, da diese für das Wiederverwenden in einer Kreislaufwirtschaft relevant sind. Anhand der vorliegenden Materialeigenschaften können Repurpose-Produkte ausgewählt werden, die aus dem Sekundärmaterial gefertigt werden können. Entscheidend hierfür sind mechanische Eigenschaften wie die Härte oder Zähigkeit und chemische Eigenschaften wie die Korrosionsbeständigkeit.

Anschließend werden Rohlinge für die Repurpose-Werkzeuge aus den verschlissenen Maschinenkreismessern entnommen und in die Fertigungsroute der konventionellen Werkzeuge integriert. Für das Ausschneiden der Rohlinge muss ein trennendes Fertigungsverfahren gewählt werden, womit aus gehärtetem Werkzeugstahl komplexe Geometrien ausgeschnitten werden können. Die ausgewählten Verfahren werden anschließend auf die Eignung im Rahmen der Repurpose-Strategie analysiert. Auftretende fer-

tigungstechnische Herausforderungen werden identifiziert und an die Repurpose-Strategie angepasst und optimiert. Im nächsten Schritt muss analysiert werden, welche Fertigungsschritte die Rohlinge aus Sekundärmaterial durchlaufen müssen. Ebenfalls betrachtet wird der Einfluss des Sekundärmaterials auf die durchgeführten Fertigungsschritte.

Um den Einfluss des Sekundärmaterials auf die Gebrauchseigenschaften der Werkzeuge zu analysieren, werden diese mit den konventionellen verglichen. Hierzu werden anwendungsnahe Verschleißversuche durchgeführt. Betrachtet wird die Verschleißbeständigkeit der konventionellen Werkzeuge gegenüber den Repurpose-Werkzeugen. Zusätzlich werden die verwendeten Stähle in standardisierten Einzelritzversuchen untersucht, um die Ergebnisse aus den anwendungsnahen Verschleißversuchen zu überprüfen. Analysiert wird hierbei der Einfluss der vorhandenen Hartphasen und wie sich der Hartphasentyp, die Hartphasengröße und die Hartphasenverteilung auf die Gebrauchseigenschaften und Verschleißbeständigkeit der Werkzeuge auswirken.

Die konzipierte Circular Economy Strategie soll auf die Umweltleistung hin bewertet werden. Hierzu wird keine vollumfängliche Nachhaltigkeitsbewertung durchgeführt. Es wird die Materialeffizienz unter Berücksichtigung der Datenbank des Cambridge Engineering Selector (CES) Selector betrachtet. Die Betrachtung findet für jeden Schritt der Repurpose-Strategie einzeln statt und wird abschließend zusammengeführt. Verglichen wird die Materialeffizienz der konventionellen Werkzeuge mit den Repurpose-Werkzeugen.

2 Grundlagen

2.1 Kreislaufwirtschaft

Die Nachfrage nach Rohstoffen und fossilen Energieträgern steigt immer weiter an. Dementgegen verknappen die Reserven an fossilen, metallischen und mineralischen Rohstoffe stetig. Aufgrund dieser Verknappung werden die benötigten Rohstoffen immer unwirtschaftlicher und unter schlechten Bedingungen der Erde entzogen. Die Stahlindustrie trägt hierzu einen großen Anteil bei, da diese ein Viertel aller industriellen Treibhausgasemissionen (THG) verantwortet [30]. Dies wiederum trägt aktiv zum Klimawandel bei. Einen Lösungsansatz zur reduzierten Entnahme von Ressourcen und der Minimierung von THG bietet das Konzept der Kreislaufwirtschaft [31].

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft ist ein Wirtschaftsmodell, das die Produktion und den Verbrauch gesamtheitlich betrachtet. Das Ziel dieses Konzepts ist, Ressourcen und Produkte so lange wie möglich zu Nutzen und damit die Lebensdauer zu verlängern. Erreicht ein Produkt irgendwann das Ende seines Lebenszyklus, soll für dessen weitere Nutzung oder die Nutzung der enthaltenen Ressourcen möglichst wenig Energie aufgewendet werden [32]. In der Anwendung bedeutet dies, dass Produkte am Ende ihres Lebenszyklus nicht auf der Deponie entsorgt werden, sondern als Sekundärrohstoff innerhalb eines wertschöpfenden Produktionskreislaufrs erhalten bleiben. Durch dieses Vorgehen kann eine zirkuläre Wertschöpfung umgesetzt werden [31].

Aktuell wird in Deutschland überwiegend ein linear verlaufender Wirtschaftsprozess verfolgt, der als Linearwirtschaft oder auch umgangssprachlich als „Wegwerfgesellschaft“ bezeichnet wird [33]. In einer Linearwirtschaft werden natürliche Ressourcen verwendet, um Primärmaterialien zu erzeugen, die wiederum zur Herstellung neuer Produkte verwendet werden. Ziel von Unternehmen in diesem Wirtschaftssystem ist, den Umsatz durch immer mehr oder teurere Produkte zu steigern [34]. In den meisten Fällen werden die erzeugten Produkte am Ende des Lebenszyklus deponiert oder verbrannt [13]. In Deutschland ist die Organisation von Abfällen bereits seit Jahren hinreichend geregelt, jedoch werden lediglich rund ein Drittel der dabei gewonnenen Sekundärrohstoffe wieder in die Wirtschaft zurückgeführt. Dies ist für eine angestrebte zirkuläre Wertschöpfung eine unzufriedenstellende Bilanz [33].

Die Transformation von einer derzeit vorwiegenden Linearwirtschaft hin zu einer Kreislaufwirtschaft

erfordert ein methodisches Vorgehen mit konkreten Maßnahmen und Strategien. Ein Rahmenmodell für ein solches Vorgehen bilden die in der Abbildung 1 dargestellten zehn Zielsetzungen oder auch 10R's nach Potting et. al [13]: Refuse, Rethink, Reduce, Reuse, Repair, Refurbish, Repurpose, Remanufacturing, Recycle, Recover. Diese sind nach ihrem Zirkularitätsgrad in drei Hauptgruppen eingeteilt. Der Zirkularitätsgrad gibt an, wie lange sich die Ressourcen oder Produkte innerhalb eines wertschöpfenden Kreislaufs befinden, wie gut diese am Ende des Lebenszyklus wiederverwertet werden können und wie viele Ressourcen für das Wiederverwenden der Ressourcen und Produkte benötigt werden. Werden für ein Produkt wenig Ressourcen benötigt und bleibt dieses lange innerhalb einer Produktkette, so wird diesem ein hoher Zirkularitätsgrad zugeordnet. Somit ist ein hoher Zirkularitätsgrad anzustreben [13].

2.1.1 Die 10 R's

Die erste Gruppe der 10R's fasst die Strategien Refuse, Rethink und Reduce unter dem Ziel einer optimierten Produktnutzung und optimierten Produktherstellung zusammen [13]. Bei diesen Strategien stehen komplett neue technologische Ansätze auf grundlegend neuer Wissensbasis im Mittelpunkt [35]. Diesen Strategien wird ein hoher Zirkularitätsgrad zugeschrieben.

- **Refuse** (Verweigern / Verwerfen): In der Strategie Refuse wird das Konzept verfolgt, ein Produkt überflüssig werden zu lassen. Hierbei soll die eigentliche Funktion des Produktes nicht länger notwendig sein oder diese durch ein anderes Produkt hinreichend erfüllt werden.
- **Rethink** (Überdenken): Rethink verfolgt die Strategie, Produkte und deren Funktionen systematisch zu überdenken, sodass die Nutzung intensiviert wird. Dabei werden Fragestellungen wie die der Notwendigkeit der Nutzung und Wiederbenutzung sowie der Entsorgung berücksichtigt. Durch eine gemeinsame Nutzung (Sharing) eines Produktes kann der Nutzungsgrad eines Produktes gesteigert werden, wodurch weniger Produkte für die Befriedigung einzelner Bedürfnisse benötigt werden [36].
- **Reduce** (Reduktion): Mit der Strategie Reduce wird das Ziel, weniger natürliche Ressourcen in Anspruch zu nehmen, verfolgt. Durch die Reduktion des Konsumverhaltens reduziert sich die Anzahl an benötigten Produkten und folglich werden weniger Ressourcen entnommen und Energie verbraucht [37].

Die Strategien der zweiten Hauptgruppe haben das Ziel, die Lebensdauer von Produkten, Einzelteilen der Produkte und den darin enthaltenen Ressourcen zu verlängern. Zu dieser Hauptgruppe zählen die fünf Strategien Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture und Repurpose [13]. Hierbei liegt der Fokus darauf, dass bestehende Technologien angepasst werden. Diese Art der inkrementellen techno-

logischen Innovation, die zu Änderung an bestehenden Produkten führt, stützt sich auf die vorhandene Wissensbasis. Im Vergleich zu der ersten Gruppe haben diese Strategien eine geringere Zirkularität.

- **Reuse** (Wiederverwendung): Reuse hat das Ziel, Produkte, die in einem guten Zustand sind und ihre Funktion weiter erfüllen, an einen neuen Nutzer weiterzugeben und so die Produktnutzungsphase zu verlängern. Dabei bleibt das Produkt in seinen Eigenschaften und seiner Funktion unverändert. Für die Verlängerung der Nutzungsphase werden keine zusätzlichen Ressourcen verwendet.
- **Repair** (Reparatur): Die Strategie Repair verfolgt das Ziel, defekte Produkte zu warten und zu reparieren. Hierdurch wird das Produkt für seine ursprüngliche Funktion instandgesetzt und kann somit weiter verwendet werden [38].
- **Refurbish** (Aufwertung): Refurbish hat das Wiederherstellen eines alten Produktes und dessen Modernisierung zum Ziel. Hierbei wird die Funktion beibehalten und die Qualität des Produktes auf den Ausgangszustand zurückgesetzt oder verbessert [39]. Diese Strategie wird meist für technische Geräte und Maschinen angewendet.
- **Remanufacture** (Refabrikation): Remanufacture wird als Second-Life-Produktion bezeichnet und berücksichtigt meist ganze Baugruppen. Dabei werden Baugruppen, Bauteile oder Ressourcen eines ausrangierten Produktes in einem neuen Produkt mit gleicher Funktion weiterverwendet [40]. Die Qualität des neuen Produktes wird durch das Verwenden der Strategie Remanufacture nicht gemindert. Ein solches Vorgehen wird beispielsweise in der Automobilindustrie eingesetzt [41].
- **Repurpose** (Umfunktionalisierung): Repurpose bezeichnet die Wiederverwendung eines gesamten Produktes, einzelner Baugruppen oder Bauteile sowie dessen Material zur Herstellung eines neuen Produktes mit geänderter Funktion [42]. Bedingt durch die geänderte Funktion grenzt sich Repurpose von Remanufacture ab. Das Ziel während der Repurpose-Strategie ist es, so wenige Produktionsschritte wie möglich von der Entnahme des Sekundärmaterials über die benötigten Produktionsschritte bis hin zum fertigen Produkt zu durchlaufen. Hierdurch wird der Energieaufwand so gering wie möglich gehalten.

Die beiden Strategien Recycling und Recover sind in der dritten Hauptgruppe eingeordnet [13]. Diese setzt sich eine ergiebige Nutzung der bestehenden Materialien als Ziel. Bei diesen beiden Strategien wird die geringste Zirkularität erreicht.

- **Recycling** (Wiederverwertung): Die Strategie Recycling hat das Ziel, Material von nicht weiter genutzten Produkten aufzubereiten, um daraus Sekundärmaterialien zu gewinnen. Die so ge-

wonnenen Materialien werden vollständig zur Herstellung neuer Produkte eingesetzt. Bei dieser Strategie wird z. B. Stahlschrott eingeschmolzen und zu neuem Rohmaterial gegossen. Diese Strategie benötigt enorme Mengen Energie. [43]

- **Recover** (Rückgewinnung): Die Strategie mit dem geringsten Zirkularitätsgrad wird als Recovery bezeichnet. Das Ziel dieser Strategie ist die Energierückgewinnung aus Abfällen, die in keiner anderen Strategie verwendet werden können. Die Rückgewinnung erfolgt meist durch die thermische Verwertung, wodurch die Produkte und Materialien unbrauchbar werden [44]. Aus diesem Grund sollte die Strategie Recovery als letzte Option betrachtet werden.

Ein wichtiger Aspekt der Kreislaufwirtschaft ist die Annahme der Prämisse, dass der Lebensstandard der Bevölkerung nicht absinkt und sich gleichzeitig in den entwickelten Ländern Wirtschaftswachstum einstellt. Die Kreislaufwirtschaft ist nicht nur ein wirtschaftliches, sondern auch ein soziales Modell und trägt aktiv zum Klimaschutz bei [31].

2.2 Werkzeugstähle

Werkzeuge zur Formgebung von Werkstoffen werden überwiegend aus Werkzeugstählen hergestellt, daher sind diese Stähle in allen Produktions- und Herstellprozessen von großer Bedeutung. In Produktionsprozessen sind Werkzeugstähle in komplexen und häufig kombinierten Beanspruchungen bei zum Teil hohen Temperaturen im Einsatz. Die Eigenschaften der Werkzeugstähle haben somit einen signifikanten Einfluss auf die Prozessproduktivität und die Qualität des Endproduktes. Allgemein werden Werkzeugstähle in Kaltarbeits- (KAS) Warmarbeits- (WAS) und Schnellarbeitsstähle (SAS; nach engl. High Speed Steels auch oft HSS) eingeteilt [45]. Die Zuordnung erfolgt über den jeweiligen Anwendungszweck und ist über die chemische Zusammensetzung nicht möglich, da diese in weiten Bereichen variiert. Je nach Hauptgruppe müssen die Werkstoffe unterschiedliche Eigenschaften erfüllen. Verschleißbeständigkeit, Härte in Kombination mit Zähigkeit sind vorwiegend bei KAS von Relevanz, wohingegen bei WAS die Warmhärte im Vordergrund steht [46]. Schnellarbeitsstähle vereinen die Eigenschaften von Kaltarbeitsstählen und Warmarbeitsstählen. HSS zeichnen sich durch den Karbidanteil der KAS und die Matrixzusammensetzung der WAS aus. Die unterschiedlichen Warmhärten der Werkzeugstähle sind in einem Anlassschaubild in Abbildung 2 dargestellt.

Kaltarbeitsstähle werden vorwiegend bis zu 250 °C eingesetzt, da die hohe Ausgangshärte der KAS oberhalb von 200 °C rasch abfällt [45–47]. Typische Anwendungszwecke sind Schneid- und Kaltumformwerkzeuge. Bei Anwendungszwecken mit erhöhten Temperaturen, bspw. für Hämmer von Schmiedemaschinen oder Druckgießformen, kommen Warmarbeitsstähle zum Einsatz. WAS haben eine geringere Ausgangshärte, die allerdings bis zu Anlass- bzw. Einsatztemperaturen von 600 °C erhalten bleibt

[46, 47]. Schnellarbeitsstähle werden aufgrund der hohen Ausgangshärte, der Anlassbeständigkeit und der Warmhärte bei hohen Temperaturen für Spanende- und Feinschneidenwerkzeuge eingesetzt [47]. Die Eigenschaften von Werkzeugstählen können über die chemische Zusammensetzung, die Art der Erzeugung und durch eine gezielte Wärmebehandlung eingestellt werden. Hierbei spielen vor allem zwei Gefügebestandteile eine entscheidende Rolle: angelassener Martensit als harte und zähe Matrix sowie Karbide, die als noch härtere Teilchen in der Matrix eingebettet sind und für einen hohen Verschleißwiderstand der Stähle sorgen [46]. Neben den späteren Gebrauchseigenschaften sind auch geeignete Verarbeitungseigenschaften erforderlich. Das gewünschte Gefüge im weichgeglühten Zustand dafür besteht aus Ferrit (weiche Matrix) und möglichst fein und gleichmäßig verteilten Karbiden in der Matrix [48].

2.2.1 Kaltarbeitsstähle

Kaltarbeitsstähle zeichnen sich durch ihre hohe Ausgangshärte aus. Diese werden bei Temperaturen in der Regel bis zu 250 °C eingesetzt und finden unter anderem eine breite Anwendung beim Schneiden von Werkstoffen [49]. Die Härte wird hauptsächlich durch die Martensitbildung erreicht. Hierzu werden 0,4 Ma.-% bis 0,8 Ma.-% C in der austenitischen Matrix gelöst und durch rasche Abkühlung aus dem Austenitgebiet Martensit gebildet [50]. Verantwortlich dafür ist der Löslichkeitsunterschied der interstitiellen Legierungselemente Kohlenstoff in Austenit und Ferrit. Die Bildung des Martensit beginnt mit der Martensitstart- (M_s) und endet mit der Martensitfinishtemperatur (M_f). Diese muss unterschritten werden, um 100 Vol.-% Martensit bilden zu können. Die M_s -Temperatur wird wesentlich von den im Austenit gelösten Legierungselementen, insbesondere des Kohlenstoff und Chromgehaltes, bestimmt. Werden die Kaltarbeitsstähle bei hohen Temperaturen angelassen, hängt die Härte weniger von der Martensitumwandlung, sondern von der Ausscheidung feiner Karbide ab. Da Martensit ein harter und spröder Gefügebestandteil ist, führt die Entspannung des Martensitgefüges durch Anlassen zu einer Zähigkeitssteigerung [51]. Zum Erschmelzen von W-, Cr- und Mo-reichen Kaltarbeitsstählen wird üblicherweise der Elektrolichtbogenofen verwendet. Der Legierungsgehalt, die verlangte Reinheit und der spätere Verwendungszweck sind ausschlaggebend für die Erschmelzungsart [52]. Anhand des C-Gehaltes werden Kaltarbeitsstähle in drei Untergruppen eingeteilt [45].

In der ersten Gruppe, den KAS 1, liegt der Kohlenstoffgehalt zwischen 0,4 Ma.-% und 0,7 Ma.-% C und zählt damit zu den untereutektoiden Stählen. Durch den niedrigen C-Gehalt sind die KAS 1 nahezu frei von Karbiden, da der Kohlenstoff beim Austenitisieren fast vollständig in der Matrix gelöst wird. Beim Härten oberhalb A_{c3} wird nicht die volle Martensithärte erreicht. Die Anwendungshärte liegt zwischen 56 - 58 HRC. Der Werkstoff C60U (1.1740) stellt einen Vertreter dieser Gruppe dar und wird zum Beispiel für Handwerkzeuge eingesetzt. [53]

KAS 2 werden eingesetzt, wenn eine höhere Härte gefordert wird. Im Gegensatz zu KAS 1 haben KAS 2 einen C-Gehalt, der zwischen 0,8 Ma.-% und 1,3 Ma.-% liegt (übereutektoiden Stähle), so dass die volle Martensithärte erreicht wird und ungelöster Kohlenstoff als Karbid zurückbleibt. Diese werden bei der Abkühlung aus dem Austenit ausgeschieden, wodurch diese fein ausgebildet sind. Bei den Ausscheidungen handelt es sich vorwiegend um Karbide vom Typ M_3C , in denen geringe Anteile der Legierungselemente gelöst sind. Dieser Karbidtyp weist eine Härte von etwa 1100 HV auf [54]. Die Härte des Karbids liegt höher als die der martensitischen Matrix. Die Härtetemperatur dieser Stähle liegt oberhalb von A_{C1e} . Ein Vertreter dieser Gruppe ist der Werkstoff 100Cr6 (1.2067) mit einer Anwendungshärte zwischen 58 HRC - 62 HRC. Er wird beispielsweise für Kaltfließpresswerkzeuge eingesetzt [50].

KAS 3 mit einem C-Gehalt von $>1,5$ Ma.-% (untereutektische oder ledeburitische Stähle) werden eingesetzt, wenn eine noch höhere Härte erforderlich ist. Durch den höheren C-Gehalt können sich neben den kleinen, nicht aufgelösten Sekundärkarbiden noch gröbere eutektische Karbide bilden, deren Mengenanteil vom Kohlenstoff- und Legierungsgehalt abhängt. KAS 3 werden beispielsweise für Maschinenkreismesser in der Papierindustrie eingesetzt und durch den Werkstoff X153CrMoV12 (1.2379) repräsentiert [53]. Dieser ist der verbreitetste Kaltarbeitsstahl mit hohem C- und Cr-Gehalt und dient in vielen Publikationen als Referenzwerkstoff [51]. Neben dem Basiselement Fe besteht der Stahl X153CrMoV12 (1.2379) aus den Elementen C, Si, Mn, Cr, Mo und V [55]. Durch den 12 Ma.-% Cr-Gehalt und den 1,5 Ma.-% C-Gehalt wird die Bildung von Cr-reichen Karbiden in großen Mengen ermöglicht, was eine hohe Verschleißbeständigkeit fördert [46]. Typische Karbide sind Cr-reiche vom Typ M_7C_3 und vom Typ $M_{23}C_6$. Die Härte der M_7C_3 Karbide liegt mit 1600 HV über der Fe-reichen Karbide vom Typ M_3C der KAS 2 [56]. Des Weiteren beeinflusst Cr die Einhärtetiefe. Durch das Auflösen der Sekundärkarbide mit steigender Härtetemperatur sinkt die M_f -Temperatur ab und der Restaustenitgehalt steigt. Beim Anlassen wandelt sich ein Teil des Restaustenits in Martensit um. Durch wiederholtes Anlassen wird der Restaustenitgehalt minimiert, sodass lediglich angelassener Martensit vorliegt. Beim Anlassen im Sekundärhärtemaximum zwischen 500 °C und 550 °C werden durch die ausreichenden Gehalte der Elemente W, Mo und V Sonderkarbide gebildet. Diese bewirken eine Steigerung des Verschleißwiderstandes und einen Anstieg der Warmhärte [57].

Für die Verschleißbeständigkeit sind neben dem Karbidtyp auch die Größe und die Verteilung der Karbide ausschlaggebend. Die Verteilung der eutektischen Karbide, die sich während des Austenitisierens normalerweise nicht auflösen, wird durch das Erstarrungsverhalten und die anschließende Warmumformung beeinflusst. Demnach sind nicht nur die chemische Zusammensetzung, sondern auch die Produktionsbedingungen wichtig, um zu definieren, wie die Karbidverteilung vorliegt. Bei der schmelzmetallurgischen Herstellungsrouten bilden konventionell gegossene Kaltarbeitsstähle grobe Karbidnetzwerke aus. Diese Netzwerke werden durch das Warm Schmieden und während des Warmwalzens

aufgebrochen und entlang der Umformrichtung ausgerichtet [58]. Die Karbide werden durch das Aufbrechen der Karbidnetzwerke in der Matrix verteilt, wodurch die Eigenschaften verbessert werden. Unter anderem steigen die Zähigkeit und die Verschleißbeständigkeit an. Liegen die Karbide nicht fein verteilt, sondern als Agglomerate vor, begünstigt dies die Rissausbreitung und die Zähigkeit ist deutlich verringert [59, 60]. Bei pulvermetallurgisch hergestellten Kaltarbeitsstählen sind die Ausscheidungen homogen in der Matrix verteilt, was die zuvor angesprochenen Eigenschaftsverbesserungen bewirkt [61].

2.2.2 Schnellarbeitsstähle

Schnellarbeitsstähle weisen komplexe Legierungssysteme auf. Diese kombinieren die Vorzüge der Eigenschaften von Warm- und Kaltarbeitsstählen [45]. Während die Ausgangshärte und die Anforderungen an die Verschleißbeständigkeit denen der Kaltarbeitsstähle ähneln, weisen Schnellarbeitsstähle zusätzlich die hohe Warmfestigkeit und Anlassbeständigkeit der Warmarbeitsstähle auf [51]. Durch diese Eigenschaften werden Schnellarbeitsstähle für Spanende- und Feinschneidenwerkzeuge eingesetzt [47]. Grundsätzlich wird zwischen verschiedenen Unterklassen von Schnellarbeitsstählen unterschieden, zum einen die Wolfram basierten vom Typ T und zum anderen in die Molybdän basierten vom Typ M [51]. Der in der Industrie am häufigsten eingesetzte Schnellarbeitsstahl ist der Stahl HS6-5-2C (1.3343) mit einem ausgewogenen W- und Mo-Gehalt. Der W-Gehalt liegt laut Norm zwischen 5,90 Ma.-% und 6,70 Ma.-%. Der Anteil an Mo liegt mit 4,70 Ma.-% bis 5,20 Ma.-% auf einem geringeren Niveau. Die hohe Anlassbeständigkeit von bis zu 600 °C ist durch das Legieren mit hohen Gehalten von W, Mo und V zu erreichen [57]. Das Wärmebehandlungsverhalten der Schnellarbeitsstähle ist ähnlich dem der Warmarbeitsstähle. Warmarbeitsstähle und Schnellarbeitsstähle bilden bei Anlasstemperaturen über 500 °C ein Sekundärhärtemaximum (Abb. 2) und Ausscheidungen aus. Aufgrund des höheren W-, Mo- und V-Gehalts in Verbindung mit dem hohen Kohlenstoffgehalt führt die Ausscheidungshärtung bei Schnellarbeitsstählen zu Härten, die mehr als 68 HRC erreichen können. Die Eigenschaften der Schnellarbeitsstähle werden durch unterschiedliche Merkmale gekennzeichnet. Zum einen die Matrix, die bei hohen Temperaturen angelassen wird und daher widerstandsfähig gegen Erwärmung ist. Zum anderen die in der Matrix eingebetteten Karbide, die einen signifikanten Beitrag zur Verschleißbeständigkeit beitragen. Je nach Herstellungsrouten des Schnellarbeitsstahls sind diese homogen oder inhomogen in der Matrix verteilt. Eine homogene Verteilung der Hartphasen liegt bei pulvermetallurgisch hergestellten Schnellarbeitsstählen vor. Wird dieser durch eine schmelzmetallurgische Herstellungsrouten produziert, können Karbidzeiligkeiten entstehen, sodass die Hartphasen inhomogen verteilt sind [58]. In Schnellarbeitsstählen sind die Ausscheidungen vom Typ M_2C (Mo-reich), M_6C (Mo- oder W-reich) und MC (V- oder Nb-reich) von Bedeutung, nicht die Cr-reichen M_7C_3 -Karbide, die vorwiegend in

den Kaltarbeitsstählen vorkommen (vgl. Kap. 2.2.1). Die Volumengehalte liegen je nach Legierungssystem des Schnellarbeitsstahls zwischen 5 Vol.-% und 20 Vol.-%. [51] Ein Vorteil der verschiedenen Karbidarten ist die höhere Härte. Die M_6C -Karbide weisen eine Härte von etwa 1500 HV auf. M_6C -Karbide scheiden sich aus, wenn der W- und Mo-Gehalt in Kombination mit dem Kohlenstoff über der Löslichkeit im Austenit liegt. Das tritt z. B. bei Stählen mit 1 Ma.-% C-Gehalt und über 3 Ma.-% W- oder Mo-Gehalt auf. Die M_6C -Karbide können auch über eine eutektische Reaktion aus der Schmelze gebildet werden, was bei Schnellarbeitsstählen mit hohen Gehalten an Wolfram der Fall ist. Beinhalten die Legierungssysteme der Schnellarbeitsstähle hohe Gehalte an Molybdän, wie der Stahl HS6-5-2C (1.3343), bilden sich metastabile eutektische M_2C -Karbide im Gusszustand aus. Diese wandeln sich beim Warmschmieden oder Warmwalzen in M_6C -Karbide und MC-Karbide um [62–64]. Die härteste Phase in Schnellarbeitsstählen bilden die MC-Karbide mit einer Härte von etwa 2200 HV, die sich vorwiegend durch die Mengen an V (ca. 1 Vol.-%) mit dem vorhandenen Kohlenstoff bilden [65].

2.3 Nesting

Bedingt durch die Automatisierung und die Weiterentwicklung von Fertigungstechnologien haben kombinatorische Optimierungsprobleme, beispielsweise Schnitt- und Packprobleme, immer mehr an Bedeutung gewonnen. Eine Vielzahl von industriellen Prozessen erfordert, dass mehrere Objekte in einem Volumen platziert werden (Additive Fertigung) oder dass Objekte auf einer definierten Fläche angeordnet werden (Wasserstrahl- und Laserschneiden). Kombinatorische Optimierungsprobleme werden als Nestingproblem klassifiziert, wenn die anzuordnenden Objekte sich nicht überlappen dürfen oder die Umgebung eine unregelmäßige Geometrie aufweist [66, 67]. Für das effiziente Lösen dieser Probleme ist die hohe Komplexität der Geometrien und Umgebungen für die aktuellen Algorithmen eine Herausforderung [67]. Bei einer hohen Anzahl an zu positionierenden Objekten oder steigender Komplexität sind die Ergebnisse derzeit wenig zufriedenstellend, da der Rechenaufwand proportional ansteigt. Um den Rechenaufwand zu minimieren, sind eine Vielzahl an Konzepten und Algorithmen entwickelt worden, die akzeptable Ergebnisse für Nestingprobleme liefern [68]. Unterschieden werden kann zwischen Basislösungen und heuristischen Lösungen [69, 70]. Basislösungen betrachten oftmals Nestingprobleme mit vielen Einschränkungen, wie z. B. das Platzieren von nur einem Objekttyp oder ausschließlich rechteckigen Objekttypen [71–73]. Die Rechenzeit nimmt mit steigender Anzahl an Objekttypen signifikant zu, da es sich um vollständige NP-Schachtelungsprobleme (nichtdeterministisch polynomielle Zeit) handelt [74]. Die Zeit, die für das exakte Lösen eines Nestingproblems benötigt wird, steigt demnach mit der Anzahl der Eingangsvariablen an. Für das schnelle Lösen dieser komplexeren Nestingprobleme sind Heuristiken entwickelt worden, die gute Lösungen finden. Diese Verfahren sind approximierende Verfahren, die jedoch nicht die optimale Lösung finden. In der Industrie werden auch

häufig beide Verfahren miteinander kombiniert. Basislösungen werden häufig mit einer reduzierten Anzahl an Eingangsvariablen dazu verwendet, eine schnelle Lösung zu finden, die anschließend durch Metaheuristiken optimiert wird [75]. Da die bestehenden Basislösungen und Heuristiken ausreichend in der Literatur beschrieben sind, wird auf die einzelnen Algorithmen nicht weiter eingegangen, stattdessen werden die möglichen Eingangsvariablen und das Ziel des Nestings betrachtet.

Durch den Einsatz von Nesting können Arbeitsprozesse in der Schnitt- und Packindustrie effizienter gestaltet und einzelne Arbeitsschritte automatisiert werden. Unabhängig vom Einsatzgebiet ist das Hauptziel eines Nestingprozesses in der Regel die Minimierung von benötigten Flächen oder Volumen, wodurch Herstellkosten reduziert und der Gewinn maximiert werden soll. Die Nestingprobleme können in Output-Maximierungsprobleme oder Input-Minimierungsprobleme sowie zusätzlich in ein-, zwei- und drei-dimensionale Probleme unterteilt werden [68, 70]. Die sogenannten Output-Maximierungsprobleme streben das Ziel an, in einem endlichen Bereich möglichst viele der geforderten Geometrien zu platzieren, sodass der Output maximiert wird. Die Input-Minimierungsprobleme hingegen weisen unbegrenzt zur Verfügung stehende Abmessungen auf. Hier ist das Ziel, dass die gewünschte Anzahl an Geometrien in einer minimalen Abmessung platziert wird. Demnach soll der Materialeinsatz für die benötigte Stückzahl minimiert werden. Darüber hinaus kann das Rohmaterial als Beschränkung definiert werden. Zusätzlich kann die Anzahl der zu platzierenden Teiletypen entscheidend sein. Cutting Stock Problems weisen wenige Teiletypen auf, wohingegen Bin Packing Problems viele Teiletypen aufweisen [68, 76].

2.3.1 Eindimensionales Nesting

Die eindimensionalen Probleme sind die am wenigsten komplexen Nestingprobleme. Diese lassen sich in der Regel einfach und effizient lösen. Ein eindimensionales Nestingproblem ist z. B. die Erstellung von Schneidplänen in der Halbzeugfertigung. Ziel dieser Nestingprobleme ist es, eine vorgegebene Anzahl an kleineren Halbzeugabmaßen aus möglichst wenig größeren Halbzeugen zu trennen. Berücksichtigt werden hierbei die zur Verfügung stehenden Längen der größeren Halbzeuge, die benötigte Stückzahl mit den entsprechenden Längen der gewünschten kleineren Halbzeugabmessungen und die Breite der benötigten Trennschnitte [77–79]. Zum Beispiel müssen aus einer unbegrenzten Anzahl an langen Rohren (Lagerbestand), unterschiedliche kleinere Rohrsegmente abgeschnitten werden. Unter Berücksichtigung der Sägeblattbreite und der gewünschten Stückzahl mit den entsprechenden Abmessungen wird ein Sägeplan erstellt, sodass durch das Nesting der entstandene Verschnitt minimiert wird [80].

2.3.2 Zweidimensionales Nesting

Die Lösungen für zweidimensionale Nestingprobleme sind gegenüber den eindimensionalen Nestingproblemen komplexer. Neben der Anzahl der zu positionierenden Objekte ist darüber hinaus deren Form, Orientierung und Lage zu berücksichtigen. Des Weiteren ist relevant, dass sich die einzelnen Objekte innerhalb einer definierten Umgebung nicht berühren, überlappen oder unnötig verteilen. Zweidimensionale Schnitt- und Packprobleme lassen sich in sechs Grundvarianten einteilen: Identical Item Packing Problem (IIPP), Placement Problem (PP), Knapsack Problem (KP), Cutting Stock Problem (CSP), Bin Packing Problem (BPP) und Open Dimension Problem (ODP) [68, 76]. In Abbildung 3 sind die einzelnen Varianten visualisiert nach Cherri et al. dargestellt [76].

Als Output-Maximierungsprobleme sind IIPP, PP und KP klassifiziert. Identical Item Packing Problem (IIPP) hat das Ziel, so viele Geometrien des gleichen Typs innerhalb einer Umgebung zu platzieren. Sollen mehrere Geometrien platziert werden, liegt das Platzierungsproblem (PP) vor. Wenn lediglich verschiedene Geometrien einmal platziert werden sollen, wird dies als Knapsack Problem (KP) definiert. Zu den Input-Minimierungsproblemen gehören CSP, BPP und ODP [76]. Das Ziel des Cutting Stock Problems (CSP) ist es, die Abmessung, in der mehrere verschiedene Geometrien platziert werden, zu minimieren. Wenn nur ein Teil jedes Typs innerhalb der Umgebung platziert werden muss, wird das Problem als Bin Packing Problem (BPP) bezeichnet. Im Open Dimension Problem (ODP) werden viele Teiltypen mit mehreren Teilen innerhalb einer Umgebung platziert. Das Ziel des CSP ist die Minimierung an benötigter Abmessung, die zum Platzieren aller geforderten Geometrien notwendig ist. Dieses Ziel kann durch mehrere Faktoren erreicht werden. Durch Variation von z. B. der Länge und der Breite der Abmessung oder auch der Anzahl der Abmessungen, wie z. B. die Anzahl an verwendeten Blechtafeln [68, 76].

Schnittprobleme sind vorwiegend zweidimensionale Nestingprobleme. Diese werden hauptsächlich in der Bekleidungsindustrie und in der Blechverarbeitung angewendet, können aber auch in der Möbelherstellung oder der Lederverarbeitung vorkommen [66, 67, 81, 82]. Neben dem Ziel der Output-Maximierung oder der Input-Minimierung finden Nebenbedingungen für das Nesting derzeit wenig Betrachtung [83]. Aktuelle Nebenbedingungen zielen auf den Fertigungsprozess ab, wie z. B. die Prozesssicherheit beim Laserschneiden [83–86]. Eine Nebenbedingung ist, dass das Verkippsverhalten der ausgeschnittenen Teile berücksichtigt wird [85, 86]. Hierbei wird die Anordnung des Nestings allerdings nicht verändert, sondern der Verfahrensweg des Schneidkopfes. Dieser wird bei Bauteilen, die möglicherweise Verkippen, vollständig hochgefahren oder die Bauteile werden umfahren. Es gibt derzeit wenige Arbeiten für das Nesting in der Metallverarbeitung, die sich mit Nebenbedingungen für den nachfolgenden Produktionsschritt befassen. Teilweise wird die Walzrichtung der Bleche beachtet, sodass alle Produkte vom selben Typ im selben Winkel zu der Walzrichtung orientiert sind [87]. Eine andere Ne-

benbedingung gibt die exakte Ausrichtung der Objekte zur Walzrichtung vor, da es ansonsten bei den anschließenden Umformprozessen zu Rissen an der Biegekante kommt [88]. In der Lederindustrie werden ebenfalls Qualitätsanforderungen des nachfolgenden Fertigungsschrittes berücksichtigt. Hierbei werden Fehlstellen auf dem Leder wie Farbfehler oder Schäden beim Nesting ausgelassen, sodass die Zuschnitte die Qualitätskriterien einhalten können [89]. Eine Berücksichtigung der Ressourceneffizienz der nachfolgenden Fertigungsschritte wird derzeit bei Nestingproblemen nicht berücksichtigt.

2.3.3 Dreidimensionales Nesting

Die dreidimensionalen Nestingprobleme sind hauptsächlich als Packprobleme definiert. Das Ziel ist es, eine möglichst optimale Anordnung von Objekten in dreidimensionalen Räumen, vorwiegend quaderförmige Volumen, zu finden. Hierbei können die zu platzierenden Objekte beliebig komplexe Geometrien annehmen. Dreidimensionale Nestingprobleme bilden den kompliziertesten Fall ab. Die Methoden und Anforderungen der zweidimensionalen Probleme finden im dreidimensionalen Raum ebenfalls Anwendung. Bedingt durch die Erweiterung der zusätzlichen Dimension, sprich dem Volumen der Objekte, sind effiziente Lösungen aufwendiger zu berechnen [68].

Das dreidimensionale Nesting lässt sich hauptsächlich in die beiden Bereiche Verpacken bzw. Stauen und die additive Fertigung unterteilen. Derzeit sind keine Arbeiten über dreidimensionale Schnittprobleme bekannt. Das Ziel beim Verpacken ist es, durch eine optimale Anordnung der Objekte sowohl Verpackungsmaterial als auch Lagervolumen zu minimieren bei gleichzeitigem Erreichen der Stapelfestigkeit zur Gewährleistung der Sicherheit. Im Prinzip unterscheidet sich Stauen vom Verpacken lediglich in der Größe des Volumens, in dem verschiedene Objekte untergebracht werden sollen. Ein Beispiel wäre das optimale Beladen der Laderäume von Schiffen. Besonders für den Logistikbereich des E-Commerce ist die Anzahl an Publikationen für optimiertes Nesting in den letzten Jahren gestiegen [90].

In dem Bereich der additiven Fertigung ist die Anzahl der Publikationen über dreidimensionales Nesting ebenfalls gestiegen. Ziel des Nestings in der additiven Fertigung ist es, die Wirtschaftlichkeit der Fertigung zu erhöhen. Durch eine optimale Anordnung der zu fertigenden Bauteile im zur Verfügung stehenden Bauraum des jeweiligen 3D-Druckverfahrens kann die Stückzahl einzelner Produktionschargen erhöht werden. Neben den Herausforderungen des dreidimensionalen Verschachtelns kommen zusätzlich verfahrensbedingte Restriktionen hinzu [91]. Hierzu zählt z. B. die Lage des Objektes im Raum und die daraus resultierende Möglichkeit, die gewünschte Geometrie zu fertigen. Die Erstellung einer Anordnung durch Nesting ist für Teile mit simplen Geometrien, bspw. Quader, nicht komplex. Die mittels additiver Fertigung produzierten Bauteile weisen jedoch zum Teil komplexe Geometrien auf, da diese durch Additive Fertigung (engl.: additive manufacturing, AM) wirtschaftlich produziert

werden können [92]. Weil das effektive Lösen von dreidimensionalen Problemen komplexer ist, finden sich in der Literatur fast ausschließlich Lösungsansätze für die Positionierung von Objekten in quaderförmigen Behältnissen [93].

2.4 Trennende Fertigungsverfahren

Die DIN 8580:2020-01 teilt den Gesamtbereich der Fertigungsverfahren in Hauptgruppen, Gruppen und Untergruppen ein [94]. Für die Entwicklung und Einführung einer Kreislaufwirtschaft ist die Weiterverwendung von Baugruppen, Bauteilen und deren Materialien ein Ziel der 10R-Strategie (Kap. 2.1.1). Für die Weiter- bzw. Wiederverwendung von Baugruppen, Bauteilen oder deren Materialien sind trennende Fertigungsverfahren notwendig. Diese werden nach DIN 8580 der dritten Hauptgruppe zugeordnet. Innerhalb dieser kann noch einmal zwischen sechs weiteren Gruppen unterschieden werden. Diese sind das Zerteilen, Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide, Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide, Abtragen, Zerlegen und Reinigen [94, 95].

2.4.1 Zerteilen

Das Trennen von Werkstücken ohne formlosen Stoff wird als Zerteilen bezeichnet und die dazugehörigen Fertigungsverfahren sind in der DIN 8580 als Fertigungsverfahren der Gruppe 3.1 zugeordnet [94]. In der DIN 8588 sind die einzelnen Fertigungsverfahren der Gruppe Zerteilen erläutert [96]. Zu diesen Verfahren zählen das Scherschneiden, Messerschneiden, Beißschneiden, Spalten, Reißen und Brechen. Das Scherschneiden ist das am häufigsten vorkommende Verfahren der Gruppe 3.1 [95]. Zwischen den einzelnen Verfahren kann zwischen Geschlossen- und Offenschneiden unterschieden werden. Das Geschlossenschneiden zeichnet sich durch eine geschlossene Kontur aus, wie es z. B. beim Lochen der Fall ist. Bei allen Verfahren wird das zu schneidende Werkstück von zwei Schneiden, die sich aneinander vorbeibewegen, zerteilt. Beim Schneidvorgang erfolgt zuerst eine elastische und dann eine plastische Verformung des Bleches. Durch weiteres Eindringen der Schneide in den Werkstoff steigt die Schubspannung bis zum Erreichen der maximalen Spannung an, sodass der Werkstoff reißt [97]. Die benötigte maximale Schneidkraft $F_{s \max}$ ist abhängig von der Blechstärke s_0 , der Schnittlänge l_s und dem Schneidwiderstand k_s [95, 98]. Für die Praxis kann die maximale Schneidkraft hinreichend genau anhand der Formel 2.1 berechnet werden und der Schneidwiderstand k_s kann aus der Zugfestigkeit nach Formel 2.2 hergeleitet werden [98].

$$F_{s \max} = l_s \cdot s_0 \cdot k_s \quad (2.1)$$

$$k_s = 0,8 \cdot R_m \quad (2.2)$$

2.4.2 Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide

Zu den Fertigungsverfahren Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden sind alle Verfahren in der Gruppe 3.2 zugeordnet, bei denen die Schneidenanzahl, die Geometrie der Schneiden und die Lage der Schneiden zum Werkstück definiert sind [94, 99]. Bei diesen Verfahren werden kontinuierlich Werkstoffschichten in Form von Spänen mechanisch abgetrennt. Zu diesen Verfahren zählen das Drehen, Bohren, Fräsen, Hobeln, Räumen, Sägen, Feilen, Bürstspanen und Schaben. In den DIN-Normen DIN 8589 Teil 1 bis Teil 9 sind die einzelnen Verfahren detailliert beschrieben [100–108]. Die Verfahren werden eingesetzt, um Werkstoffe nach dem Ur- und Umformen fertig zu bearbeiten. Die Zerspanbarkeit von Werkstoffen hängt von mehreren Faktoren ab und drückt die Eigenschaft aus, einer spanenden Bearbeitung Widerstand entgegenzusetzen [95]. Da in dieser Arbeit kein Fertigungsverfahren für die Herstellung der Repurpose-Werkzeuge aus dieser Gruppe verwendet wurde, wird auf die Verfahren nicht weiter eingegangen.

2.4.3 Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide

Die Fertigungsverfahren des Spanens mit geometrisch unbestimmten Schneiden sind in der Gruppe 3.3 eingeteilt [94, 99]. In den DIN-Normen 8589 Teil 11 bis Teil 17 sind die einzelnen Verfahren detailliert beschrieben [109–114]. Die Schneidenanzahl, Geometrie des Schneidkeils und die Lage der Schneide zum Werkstück sind bei diesen Verfahren unbestimmt. Schneidkörner bilden bei diesen Fertigungsverfahren die Schneidkeile. Diese können entweder in einem Werkzeug gebunden vorliegen oder ungebunden in einer Suspension [95]. Zu diesen Verfahren zählen das Schleifen, Bandschleifen, Hubschleifen, Honen, Läppen, Strahlspanen und Gleitspanen. Als Schleifkörner werden sowohl natürliche Werkstoffe wie Quarz oder Diamant als auch synthetische wie SiC, B₄C oder BN verwendet. Die Korngrößen der verwendeten Schleifkörner liegen zwischen 0,5 µm und 350 µm [98].

Wasserstrahlschneiden

Das Wasserstrahlschneiden ist ein häufig in der Industrie verwendetes Fertigungsverfahren. Dieses wird nach DIN 8580 der Untergruppe 3.3.6 (Strahlspanen) zugeordnet [94]. Unterschieden werden kann zwischen Wasserstrahlschneiden mit Reinwasser und Wasserstrahl-Abrasiv-Schneiden. Mit dem Reinwasser arbeitende Verfahren können weiche Werkstoffe wie Thermoplaste oder Schaum- und Dämmstoffe geschnitten werden. Da in dieser Arbeit Wasserstrahl-Abrasiv-Schneiden für das Schneiden von Werkzeugstahl verwendet wurde, wird im Folgenden nur auf dieses Verfahren eingegangen.

Zum Schneiden harter Werkstoffe werden dem Wasserstrahl feinkörnige Abrasivpartikel beigemischt. Hierfür werden zwischen 150 g und 250 g Granat-, Olivin- oder Quarzsand pro Liter Wasser verwendet [115]. Die Partikel weisen einen Durchmesser zwischen 0,1 mm und 0,5 mm auf. Die Abtragsleistung während des Wasserstrahlschneidprozesses nimmt mit der Härte und Scharfkantigkeit der einzelnen Abrasivpartikel zu. Für den Schneidprozess werden Drücke zwischen 1000 bar und 4000 bar benötigt. Die enthaltene kinetische Energie des Schneidstrahls wird beim Auftreffen auf die Materialoberfläche in potenzielle Energie umgewandelt. Hierdurch wird die Materialoberfläche stoßartig beansprucht, was eine plastische Verformung zur Folge hat. Durch die örtlich begrenzte Zerstörung der Materialoberfläche kann der angreifende Wasserstrahl mikroskopisch kleine Werkstoffteilchen aus dem Material herausreißen [116]. Eine Kaltverfestigung der schnittflächennahen Randzone lässt sich nicht nachweisen. Mit steigender Schnitttiefe verliert der abrasiv wirkende Strahl durch Reibungsverluste an den Schnittflächen an Energie. Die Schnittqualität sinkt aufgrund des Energieverlustes mit zunehmender Schnitttiefe. Die Qualität der Schnittfläche kann nach VDI 2906 Blatt 10 bestimmt werden [117]. In dieser sind die Kenngrößen der Schnittflächen beim Wasserstrahl-Abrasiv-Schneiden dargestellt. Mit zunehmender Materialstärke ist ebenfalls ein Nachlaufen dieser Riefen zu sehen [118].

Die Schneidtechnologie des Wasserstrahlschneidens wird als der „kalte Schnitt“ bezeichnet [119]. Gegenüber dem Laserschneiden entstehen während des Wasserstrahlschneidens keine Wärmeeinflusszonen entlang der Schnittfläche, sodass keine Aufhärtung des Materials vorliegt. Des Weiteren entstehen durch den kalten Schnitt keine rissbegünstigenden Eigenspannungen, keine Oxidationen an der Schnittfläche und kein durch Wärme eingebrachter Verzug. Generell weist das Wasserstrahl-Abrasiv-Schneiden diverse Vorteile auf, die im Folgenden zusammengefasst werden. Mittels Wasserstrahlschneiden können beliebige filigrane und komplizierte Konturen ausgeschnitten werden. Der Start- und Endpunkt des Schnitts kann an jeder beliebigen Position der Werkstückoberfläche liegen. Durch das Wasserstrahl-Abrasiv-Schneiden können nahezu alle Werkstoffe getrennt werden, was mit anderen Verfahren nicht möglich ist. Die Programmherstellung für das Ausschneiden ist kostengünstig und schnell, da die Dateien, z. B. dxf-Dateien, direkt importiert werden können.

2.4.4 Abtragen

Abtragen wird laut Norm DIN 8580 in die Gruppe 3.4 der Fertigungsverfahren eingeordnet [94]. Innerhalb dieser Gruppe wird zwischen dem thermischen, chemischen und elektrochemischen Abtragen unterschieden. In der Norm DIN 8590:2003-09 sind die unterschiedlichen Verfahren eingeordnet, unterteilt und Begrifflichkeiten definiert [120]. Abtragen bezeichnet das nicht mechanische Abtrennen von einem festen Körper. Hier bezieht sich das Abtragen sowohl auf das Abtrennen von Werkstoffschichten und Werkstoffteilchen. Thermisches Abtragen ist durch das Abtrennen von Werkstoffteilchen in

festem, flüssigen oder gasförmigem Zustand durch Wärmevorgänge definiert. Zu diesen Verfahren gehören z. B. das autogene Brennschneiden, Plasmaschneiden oder Laserstrahlschneiden. Die chemischen Abtrageverfahren zeichnen sich durch eine chemische Reaktion zum Abtrennen der Werkstoffe aus. Zu diesen Verfahren zählt unter anderem das Ätzen. Für das elektrochemische Abtragen wird der metallische Werkstoff in einer Elektrolytlösung unter Einwirkung eines elektrischen Stromes aufgelöst. Diese Verfahren werden als elektrochemisch Abtragen (EC-Abtragen) bezeichnet. Da in dieser Arbeit das thermische Abtragen Laserstrahlschneiden verwendet wurde, wird im Folgenden auf dieses Fertigungsverfahren genauer eingegangen.

Laserstrahlschneiden

Das Laserstrahlschneiden ist laut DIN 8580 der Untergruppe 3.4.1 Thermisches Abtragen zugeordnet [94]. Das Laserschneiden kann in Laser-Brennschneiden, Laser-Schmelzschnitten und Laser-Sublimierschnitten in Abhängigkeit der Zustandsänderung eingeteilt werden [98, 121]. Diese Einteilung erfolgt in Abhängigkeit der Zustandsänderung der Schnittfuge. Die Zustandsänderung der Schnittfuge wird durch die Laserleistung und das verwendete Schneidgas bestimmt. Während des Brennschneidens oxidiert der Werkstoff vorwiegend, wohingegen beim Schmelzschnitten der Werkstoff aufschmilzt. Das Sublimierschneiden zeichnet sich durch das Verdampfen des Werkstoffs aus. Für das Schneiden metallischer Werkstoffe werden vorwiegend CO₂-Gaslaser oder Nd:YAG-Festkörperlaser als Energiequelle eingesetzt [122]. Auf die Laserstrahlerzeugung wird nicht eingegangen, da diese in mehreren Arbeiten ausführlich erläutert ist [98, 123–127]. In der Lasermaterialbearbeitung ist das Laserschneiden die häufigste industrielle Anwendung des Lasers, da es eine hohe Qualität und Produktivität gegenüber anderen Verfahren bietet [128]. Der durch die Energiequelle erzeugte Laserstrahl wird durch mehrere Optiken im Schneidkopf fokussiert. Dieser tritt anschließend mit einem koaxialen Gasstrom über eine Düse aus dem Schneidkopf aus und trifft auf die Materialoberfläche. Der Werkstoff wird aufgeschmolzen und teilweise oder ganz verdampft [129]. Die aufgeschmolzene Schmelze wird durch den koaxial gerichteten Gasstrahl aus der Schnittfront ausgeblasen. Die Gasdrücke erreichen Werte bis zu 20 bar [124]. Durch die Relativbewegung der Strahlen und des Werkstücks entsteht die Schnittfuge. Der auf die Materialoberfläche treffende Laserstrahl kann hindurchgelassen, reflektiert oder absorbiert werden. Werkstoffe können lediglich durch Absorption des Laserstrahls erwärmt werden. In der DIN 32516:2022-09 ist die werkstoffbedingte Schneideignung definiert [130].

In der Norm DIN EN ISO 9013 wird die Qualität einer thermischen Schnittkante definiert [121]. Zu den Qualitätsaspekten zählen die Maßhaltigkeit, die Form der Schnittflanke, die Schnittspaltbreite, die Rauigkeit, die Bartbildung und die Wärmeeinflusszone. Ähnlich wie beim Wasserstrahl-Abrassiv-Schneiden (Kap. 2.4.3) bilden sich entlang der Schnittfläche Riefen aus. Die Riefenbildung ist auf

komplexe Wechselwirkungen zwischen den Gas- und Schmelzeströmen zurückzuführen, zu denen es mehrere Ansätze in der Literatur gibt [129]. Die Riefenstruktur nimmt von der Strahleintrittsseite bis zur Strahlaustrittsseite zu [122]. Neben der Oberflächenrauheit, die maßgeblich durch die sich ausbildenden Riefen beeinflusst wird, ist die Breite der Wärmeeinflusszone ein entscheidendes Maß für die Qualität des Laserschneidprozesses. Die thermisch beeinflusste Zone bildet sich entlang der Schnittfläche aus und weist gegenüber dem Grundgefüge andere Materialeigenschaften auf. Die durch den Laserstrahl eingebrachte Wärme entlang der Schnittfuge führt ebenfalls zu einer Erwärmung entlang der Schnittfläche, sodass sich ein teilaufgeschmolzener und wärmebehandelter Bereich ausbildet. Die Breite der Wärmeeinflusszone wird sowohl von den Prozessparametern als auch von den Materialeigenschaften beeinflusst. Zu den Prozessparametern zählen die Laserleistung und die Vorschubgeschwindigkeit [131]. Bei den Materialeigenschaften zählen die Wärmeleitfähigkeit aber auch die Materialstärke als Einflussfaktoren [129, 132]. Diese relativ schmale Zone ist durch einen erheblichen Temperaturgradienten gekennzeichnet, dessen Intervall von der Schmelztemperatur bis zur Raumtemperatur geht. Die Gefüge- und Phasenumwandlungen, die in der Wärmeeinflusszone (WEZ) im Zuge der schnellen Erwärmung und Abkühlung auftreten, führen insbesondere zu einer Veränderung der Härte [131–133]. Durch die Änderung der Materialeigenschaften in der Wärmeeinflusszone muss diese nach dem Laserschneiden oftmals entfernt werden. Durch die Aufhärtung in der wärmebeeinflussten Zone, mögliche Eigenspannungen infolge von thermischem Verzug und der daraus resultierenden Rissbildung können Bauteile im späteren Einsatz versagen [98].

Die vielfältigen Möglichkeiten des Laserschneidens sind mit denen des Wasserstrahlschneidens (Kap. 2.4.3) vergleichbar. Der Start des Schnitts einer beliebigen Kontur kann an jeder Position auf der Werkstückoberfläche erfolgen, ebenso der Endpunkt der zu schneidenden Kontur. Im Gegensatz zum Wasserstrahlschneiden ist es beim Laserschneiden nicht möglich, Werkstoffverbunde mit signifikant unterschiedlichen Schmelzpunkten zu schneiden.

2.4.5 Zerlegen

Das Trennen von zuvor gefügten Werkstücken ohne stoffliche Verbindung wird als Zerlegen bezeichnet und ist nach Norm DIN 8580 in der Gruppe 3.5 eingeteilt [94]. Die einzelnen Untergruppen des Zerlegens sind in der Norm DIN 8591 definiert [134]. Die Untergruppen sind in Auseinandernehmen, Entleeren, Lösen kraftschlüssiger Verbindungen und Zerlegen von durch Urformen gefügten Teilen unterteilt. Da die in dieser Arbeit verwendeten Maschinenkreismesser aus keinem zusammengesetzten Bauteilverbund bestehen, finden diese Verfahren keine Anwendung in der konzipierten circular economy Strategie. Da das Zerlegen Vorteile für mehrere 10R Strategien (Kap. 2.1.1) bietet, sind diese Verfahren dennoch mit aufgezeigt. Vanegas et al. konnte zeigen, dass eine leichte Zerlegbarkeit von

Produkten die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft unterstützt [135]. Strategien zur Verlängerung der Produktlebensdauer wie Reparatur, Wiederverwendung und Produktgewinnung für die Wiederverwendung von Komponenten erfordern alle einen erleichterten Zugang zu den Produktkomponenten. Der verringerte Demontageaufwand führt dazu, dass die Wiederaufarbeitung von Produkten oder die Wiederverwendung von Komponenten als End-of-Life-Strategie (EoL) gegenüber dem Recycling oder der Entsorgung bevorzugt wird [136, 137].

2.5 Eigenspannungen

Liegen Spannungen in einem Bauteil vor, ohne dass eine äußere Kraft oder ein Temperaturgradient auf das Bauteil wirkt, werden diese Spannungen als Eigenspannungen bezeichnet [138, 139]. Die in einem Bauteil vorhandenen Zug- und Druckspannungen liegen im Gleichgewicht vor [138]. Es ist notwendig im Bauteil vorhandene Eigenspannungen zu betrachten, da die Kenntnis über diese möglichen Bauteilversagen verhindern kann. Eigenspannung entstehen als Begleiterscheinung bei der Herstellung von Produkten durch Formgebungs- und Bearbeitungsvorgängen [140]. Bei technischen Verformungen durch bspw. Walzen entstehen in dem gewalzten Material Eigenspannungen, deren Größe und Verteilung nicht bekannt ist, daher bilden diese eine spezifische technische Gefahr für Bauteilversagen [138, 141]. Bei den Eigenspannungen wird zwischen Eigenspannungen I.-, II.-, und III.-Art unterschieden [142, 143]. Die wirkenden Eigenspannungen setzen sich aus allen drei Arten von Eigenspannungen nach Formel 2.3 zusammen [144].

$$\sigma_{\text{ES}} = \sigma_{\text{ES,I}} + \sigma_{\text{ES,II}} + \sigma_{\text{ES,III}} \quad (2.3)$$

- **Eigenspannungen I.-Art ($\sigma_{\text{ES,I}}$):** Die Eigenspannungen I.-Art werden als Makrospannungen bezeichnet. Diese charakterisieren den wirksamen Eigenspannungsanteil über größere Bauteilbereiche [140]. In diesen Bereichen liegen die Eigenspannungen I.-Art über mehrere Körner nahezu homogen vor [143]. In jedem beliebigen Schnitt durch das Bauteil liegen die mit Eigenspannungen I.-Art verbundenen Kräfte im Gleichgewicht. Wird in das Kräfte- und Momentengleichgewicht eingegriffen, treten makroskopische Maßänderungen auf.
- **Eigenspannungen II.-Art ($\sigma_{\text{ES,II}}$):** Die Eigenspannungen II.-Art werden den Mikrospannungen zugeordnet [144]. Als Mikrospannungen werden Abweichungen vom makroskopischen Mittelwert bezeichnet [139]. Diese sind in Bereichen von einem Korn oder einem Kornbereich nahezu homogen. Die Kräfte und Momente die mit Eigenspannungen II.-Art verbunden sind, sind über mehrere Körner im Gleichgewicht [143]. Durch externes Eingreifen in das Gleichgewicht können ebenfalls makroskopische Maßänderungen auftreten.

- **Eigenspannungen III.-Art ($\sigma_{\text{ES,III}}$):** Eigenspannungen III.-Art werden ebenfalls den Mikrospannungen zugeordnet. Diese treten in kleinsten Werkstoffbereichen von der Größenordnung mehrerer Atomabstände auf. Dabei liegen die Eigenspannungen III.-Art in diesen kleinsten Bereichen inhomogen vor [143, 144]. Wird in dieses Gleichgewicht eingegriffen, treten keine makroskopischen Maßänderungen auf.

Die Ursache für die Entstehung von Eigenspannungen sind plastische Verformungen, inhomogene Gefüge oder thermische Einflüsse [145]. Beeinflussen die genannten Ursachen größere Bereiche in Bauteilen bzw. Werkstoffen, sind diese Auslöser von Eigenspannungen I.-Art (Makrospannungen) [140]. Mikrospannungen, demnach die Eigenspannungen II.- und III.-Art, werden durch verschiedene Gitterbaufehler auf mikrostruktureller Ebene verursacht. Eigenspannungen II.-Art werden z. B. durch Ausscheidungsvorgänge verursacht, wohingegen Versetzungen und Leerstellen Eigenspannungen III.-Art verursachen [139, 140, 143]. Neben den in Fertigungsprozessen als begleiterscheinung entstanden Eigenspannungen, werden bei der Herstellung von Werkzeugen gezielt Eigenspannungen indiziert, um zuvor entstandenen Verzug auszugleichen. Auf den technischen Nutzen der gezielt eingebrachten Eigenspannungen soll im Folgenden tiefer eingegangen werden.

2.5.1 Das Spannen von scheibenförmigen Werkzeuge

Scheibenförmige Schneidwerkzeuge, wie z. B. das Kreissägeblatt sind eines der am häufigsten verwendeten Bearbeitungswerkzeuge [146, 147]. Im Einsatz dieser Werkzeuge ist die dynamische Stabilität relevant für die Funktionalität, da diese sich auf die Schnittqualität, den Lärm, die Vibrationen, den Materialabfall und die Lebensdauer des Werkzeugs auswirkt [148]. Die dynamische Stabilität einer Kreissäge oder eines Kreismessers hängt von seiner Eigenfrequenz und der Spannungsverteilung ab [149]. Während des Einsatzes können Kreismesser instabil werden, sodass diese beginnen bei einer kritischen Drehzahl zu flattern. Diese Instabilität wird bei einer kritischen Drehzahl als Schwingungsresonanz Phänomen bezeichnet [150, 151]. Bedingt durch das Flattern wird das Kreismesser auf Wechselbiegung beansprucht, dass Beschädigungen in Form von Rissen und anschließendem Versagen hervorruft [152]. Das sogenannte Spannen der scheibenförmigen Werkzeuge verändert die Schwingungsfrequenzen und kann durch eine optimale Verteilung die dynamische Stabilität verbessern [153]. Das Einbringen der Eigenspannungen in die Werkzeuge kann durch Hammer-, Walz- oder thermisches Spannen durchgeführt werden [147, 153, 154]. Da das Spannen der in dieser Arbeit verwendeten Maschinenkreismesser erfolgt, wird im Folgenden auf dieses Verfahren eingegangen.

Beim Spannungswalzen wird die Spannung kontinuierlich in das Werkzeug eingebracht. Dies erfolgt in konzentrischen Kreisen oder als Spirale. Diese beiden Varianten sind in Abbildung 5 gegenübergestellt. Während des Walzvorganges ist es erforderlich, dass der Druck eingestellt und reguliert werden kann.

Die Werkzeuge müssen für das Spannungswalzen geringen Verzug aufweisen oder in Bezug auf den Mittelpunkt gleichmäßig gewölbt sein [154]. Dieser Zustand kann durch zusätzliches Richten durch Hammerschläge eingestellt werden. Der Prozess des Walzspannens ist gegenüber dem Hammerspannen kontrollierter und die Spannungsverteilung wird gleichmäßiger ausgebildet [155]. Während des Spannens werden zwei gegenüberliegende Walzen auf das Maschinenkreismesser gedrückt. Durch das Antreiben einer oder beider Walzen, dreht sich das Maschinenkreismesser und die Walzen drücken eine flache Rille in beide Seiten [149, 156]. Hierdurch wird Material verformt, was Spannungen sowohl innerhalb des Spannungswalzringes als auch an den angrenzenden Bereichen indiziert. Dieser Vorgang wird bis zum gewünschten Spannungszustand mehrmals an verschiedenen Positionen auf dem Maschinenkreismesser durchgeführt [147]. Die maximale Druckspannung tritt dabei in der Walzspurmitte auf [157]. In den nicht gewalzten Bereichen neben der Spannungswaluspur liegen Zug-Eigenspannungen vor [158]. In Abbildung 6 sind die Spannungsbereiche nach dem Spannungswalzen dargestellt [159]. Die Prozessparameter wie die Walzkraft, die Position der Walzbahnen, die Anzahl der Walzüberfahrten über dieselbe Walzbahn oder die Blechdicke und der daraus resultierende Einfluss auf den Spannungszustand ist in der Literatur hinreichend beschrieben [160–164].

2.6 Verschleiß

Die Verschleißbeständigkeit von Werkstoffen ist keine Materialeigenschaft, sondern wird durch die Eigenschaft des tribologischen Systems bestimmt. Das tribologische System beschreibt die Wechselwirkung des betrachteten Werkstücks (Grundkörper) mit einem Gegenkörper. Der Gegenkörper, der Grundkörper und in manchen Fällen auch Zwischenmedien bilden die Verschleißpaarung. Tribomechanische oder tribochemische Wechselwirkungen zwischen Grund- und Gegenkörper werden durch Relativbewegungen, Temperaturänderungen, hohe Kräfte oder Angriffe aus einem umgebenden Medium ausgelöst [165]. Die Abbildung 7 zeigt schematisch ein tribologisches System (Tribosystem), welches alle an der tribologischen Beanspruchung beteiligten Komponenten beinhaltet. Als Systemstruktur werden der Grundkörper, der Gegenkörper, der Zwischenstoff und das Umgebungsmedium bezeichnet. Die Bewegungsart und -form, die Temperatur, die Geschwindigkeit und die Dauer der Belastung werden als Beanspruchungskollektiv bezeichnet [165–167].

Der fortschreitende Materialverlust des Grundkörpers wird als Verschleiß bezeichnet und durch mechanische Ursachen hervorgerufen. Diese entstehen durch den Kontakt des Grundkörpers und den Relativbewegungen von festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpern. Die entstandene Beanspruchung auf den Grundkörper wird als tribologische Beanspruchung bezeichnet. Da die Verschleißbeständigkeit keine Materialeigenschaft ist, sondern vom Beanspruchungskollektiv des tribologischen Systems abhängig ist, können minimale Modifikationen zu signifikanten Veränderungen der systemspezifischen

Verschleißkenngrößen führen [165–168].

Ein Vergleich von verschiedenen tribologischen Systemen kann durch quantitative Verschleißmessgrößen erfolgen, die die Veränderungen des Grundkörpers erfassen [168, 169]. Hierbei werden sichtbare Verschleißerscheinungsformen betrachtet, um die vorhandenen Verschleißmechanismen zu identifizieren [170]. Die Verschleißmechanismen zeigen die ablaufenden physikalischen und chemischen Wechselwirkungen während des Verschleißvorganges auf. Die vier Verschleißmechanismen sind Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung und tribochemische Reaktionen [165, 166, 169, 171]. Des Weiteren wird zwischen den Verschleißarten Gleit-, Wälz-, Prall-, und Furchungverschleiß unterschieden [165].

2.6.1 Verschleißarten

Die verschiedenen Verschleißarten beschreiben die Bewegung der im tribologischen System wirkenden Körper zueinander. Hierbei wird zwischen offenen und geschlossenen Systemen unterschieden. Zu den offenen Systemen zählen Gleit-, Wälz-, Prall-, und Furchungverschleiß durch einen Gegenkörper. Die Verschleißarten Strahl-, Strömungs- und Furchungverschleiß durch Teilchen gehören zu den geschlossenen Systemen [165, 166].

Gleitverschleiß

Tritt Verschleiß durch das Aufeinandergleiten von zwei in Kontakt befindlichen Oberflächen auf, wird diese Verschleißart als Gleitverschleiß bezeichnet. Hierbei können die Gleitflächen verschiedene Formen aufweisen, aus verschiedenen Materialien hergestellt sein oder unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheiten aufweisen [170]. Des Weiteren kann zwischen Festkörper-Gleitverschleiß und Trocken-Gleitverschleiß unterschieden werden. Hierbei ist entscheidend, ob ein Zwischenmedium verwendet wird. Dieses Zwischenmedium fungiert als Schmierfilm, der eine Trennung der Gleitflächen anstrebt [166]. Gleitverschleiß geht immer mit Gleitreibung und den damit auftretenden thermischen Prozessen sowie dadurch wiederum entstehenden Temperaturveränderungen einher [172]. Als sichtbare Verschleißerscheinungsformen sind beim Gleitverschleiß Mikrostrukturänderungen der Oberfläche und die Bildung von Verschleißpartikeln zu beobachten. Durch diese Formen lassen sich die Verschleißmechanismen im Nachhinein näher spezifizieren. Beispiele für technische Anwendungen, bei denen Gleitverschleiß auftritt, sind Gleitlager mit Wellen [170].

Wälzverschleiß

Wälzverschleiß tritt in tribologischen Systemen mit wälzenden Beanspruchungen auf. Als Wälzen wird eine Beanspruchungsart definiert, bei der die Gleitanteile den reinen Rollvorgang überlagern [170]. Hierbei ist nur ein kleiner Teil der gesamten Funktionsoberfläche des wälzbeanspruchten Teils belastet.

Das Ausbilden von Gleitstellen lässt sich nicht vermeiden, trotz optimaler konstruktiver Auslegung der Wälzelemente [173]. Diese Verschleißart tritt vorwiegend in Walzlagern wie Rillenkugellagern oder Zylinderrollenlagern auf. Bei dieser Verschleißart ist die Oberflächenzerrüttung der vorwiegende Verschleißmechanismus. Durch die wirkenden Belastungskräfte und Reibungskräfte in Wälzlagern entstehen Normal- und Tangentialspannungen, die bei jeder Umdrehung auf die betrachtete Stelle einwirken. Die wechselnde Beanspruchung der Oberfläche bewirkt durch Gefügeänderungen und Rissausbildung ein Ausbrechen von Verschleißpartikeln an der Oberfläche [166]. Das Ausbrechen führt zu sogenannter Grübchenbildung. Diese ist die am häufigsten auftretende Verschleißerscheinungsform beim Wälzverschleiß.

Prallverschleiß

Prallverschleiß tritt durch ein ständiges Zusammenstoßen von Partikeln mit hoher Härte auf einen Grundwerkstoff auf. Das Zusammenprallen der Partikel mit dem Grundwerkstoff führen zu einer mechanischen Beanspruchung, wodurch sowohl der Partikel als auch der Grundwerkstoff zerstört werden kann. Erosion wird die absichtliche Zerstörung genannt. Geschieht die Zerstörung der Wand unbeabsichtigt, wird dies als Prallverschleiß benannt [174]. Die dabei entstehende Stoßenergie hat eine Deformation der Oberfläche zur Folge. Es kommt zu plastischer Verformung, Rissbildung, kurzzeitiger Temperaturerhöhung und stofflichen Veränderungen der Oberflächenbereiche durch mechanisch und thermisch aktivierte Vorgänge [174, 175]. Während des Prallverschleißes können verschiedene Verschleißmechanismen einzeln oder kombiniert wirken [166].

Furchungverschleiß

Als Furchungverschleiß wird das unerwünschte Abtragen von Material an der Oberfläche bezeichnet. Dies geschieht durch eine Relativbewegung eines härteren eindringenden Körpers in die Oberfläche des Grundkörpers [176]. Verschleißerscheinungsformen sind durch Abrasionsprozesse entstandene Furchen, Kratzer und Riefen. Furchungverschleiß kann wie bereits erwähnt in offenen und geschlossenen Systemen auftreten [166]. In geschlossenen Systemen wird diese Verschleißart als Gegenkörperfurchung oder Zwei-Körper-Abrasion bezeichnet. Bei diesen Systemen sind lediglich der Grund- und der Gegenkörper beteiligt. In offenen Systemen wird Furchungverschleiß als Teilchenfurchung oder Drei-Körper-Abrasion bezeichnet. Für den Materialabtrag sind in das System eindringende Teilchen verantwortlich. Die Härte und Größe des abrasiv wirkenden Gegenkörpers hat signifikanten Einfluss auf den Verschleiß [177, 178]. Während des Furchungverschleiß greifen vorwiegend die Verschleißmechanismen Mikropflügen und Mikrospanen bzw. eine Kombination aus beiden an [166].

2.6.2 Verschleißmechanismen

Die den Verschleißvorgang verursachenden physikalischen und/oder chemischen Prozesse sind Verschleißmechanismen, die sich durch das Einwirken des Beanspruchungskollektivs ergeben [165]. Diese greifen im Kontaktbereich eines tribologischen Systems an und lösen Elementarprozesse aus, die zu Form- und Stoffänderung der Kontaktpartner führen. Die elementaren Wechselwirkungen, die zu dem Verschleiß der kontaktierten Werkstoffe führen, können in zwei Gruppen eingeteilt werden. Die energetischen, spannungsmäßigen und kräftemäßigen Wechselwirkungen führen zu Rissvorgängen im Material und Stoffabtrennungen an der Oberfläche. Diese Wechselwirkungen treten bei der Oberflächenzerrüttung und Abrasion auf. Atomare und molekulare Wechselwirkungen hingegen treten bei den Verschleißmechanismen Adhäsion und Tribochemische Reaktion auf. Hier kann der Verschleiß auf das Auftreten chemischer Bindungen im Kontaktbereich zurückgeführt werden [166]. In technischen Anwendungen überlagern sich die einzelnen Verschleißmechanismen und können während der Beanspruchung den Anteil am Verschleißprozess ändern [170]. Im Folgenden werden die einzelnen Verschleißmechanismen detaillierter erläutert.

Abrasion

Abrasion tritt auf, wenn der Gegenkörper härter und rauer als der Grundkörper ist und es zu einem tribologischen Kontakt kommt. Des Weiteren kann Abrasion auftreten, wenn harte Abrasivpartikel in den beanspruchten Werkstoff eingedrückt werden [179, 180]. Durch die Relativbewegung des weicheren Grundkörpers und des härteren Gegenkörpers entsteht eine furchende Beanspruchung aus der Riefen, Kratzer oder auch Mulden resultieren [45, 165, 166, 176]. Unterschieden werden kann zwischen den vier Mikromechanismen Mikropflügen, Mikrospanen, Mikroermüden und Mikrobrechen [181]. Diese sind in Abbildung 8 schematisch dargestellt. Ideales Mikropflügen wird dadurch gekennzeichnet, dass bei einmaliger Beanspruchung durch ein einzelnes abrasiv wirkendes Teilchen kein Materialabtrag erfolgt. Der Grundkörper wird durch das abrasive Teilchen stark plastisch verformt. Das Material wird beim Mikropflügen an den Furchungsrändern aufgeworfen. Wird durch das abrasiv wirkende Teilchen ein Mikrospan gebildet, wird dieser Mikromechanismus als Mikrospanen bezeichnet. Ideales Mikrospanen zeichnet sich dadurch aus, dass das Volumen des Mikrospans gleich dem Volumen der entstehenden Verschleißfurche ist. Überlagern sich diese beiden Mikromechanismen, kann der relative Anteil der Teilprozesse Mikropflügen und Mikrospanen durch den f_{ab} -Wert ermittelt werden. Dieser setzt sich laut Formel 2.4 aus den Flächen A_v , A_1 und A_2 zusammen [166, 170]. A_v ist das Volumen bzw. die Fläche der Furche. Die Werte A_1 und A_2 geben das Volumen bzw. die Fläche des Aufwurfs rechts und links neben der Furche an. In Abbildung 10 sind die enthaltenen Flächenanteile schematisch dargestellt. Diese werden durch mikroskopische Auswertungen von Einzelritzversuchen bestimmt. Liegt

reines Verformen vor, demnach ideales Mikropflügen, beträgt der f_{ab} -Wert = 0. Bei einem f_{ab} -Wert = 1 liegt ideales Zerspanen vor.

$$f_{ab} = \frac{A_v - (A_1 + A_2)}{A_v} \quad (2.4)$$

Neben den zuvor genannten Mikromechanismen kann es durch wiederholtes Mikropflügen zu lokaler Werkstoffermüdung kommen. Dieser Mechanismus wird Mikroermüden genannt (Abb. 8c) und wird eigentlich der Oberflächenzerrüttung zugeordnet. Der vierte Mikromechanismus wird als Mikrobrechen bezeichnet. Dieser tritt bei vorwiegend bei spröden Werkstoffen oberhalb der kritischen Belastungsgrenze auf. Durch Rissbildung und Rissausbreitung kann dies zu größeren Materialausbrüchen führen. [166]

Oberflächenzerrüttung

Oberflächenzerrüttung entsteht vorwiegend durch zyklische Beanspruchung von Festkörperoberflächen. Lokalisierte plastische Verformung führt zu kleinen Anrissen an der Materialoberfläche, die sich ausbreiten und anschließend zu Ausbrechen des Materials führen [166]. Wechselnde Zug- und Druckspannungen können ebenfalls zu Oberflächenzerrüttung führen, die durch Wälzkontakte entstehen [166, 170]. Das Verschleißverhalten kann in vier Phasen in Abhängigkeit des Ermüdungsprozesses eingeteilt werden. Zu Beginn liegt die Inkubationsphase vor, in der sich Gitterverzerrungen und -fehler aufsummieren. Bedingt dadurch entstehen in der zweiten Phase kleine Mikrorisse, die sich anschließend in der dritten Phase ausbreiten. Die vierte Phase ist der Bruch und damit die endgültige Schädigung der Materialoberfläche.

Adhäsion

Adhäsion wird zum Teil auch als Haftverschleiß bezeichnet. Gegenüber den zuvor beschriebenen Verschleißmechanismen Oberflächenzerrüttung und Abrasion, die im Wesentlichen durch Kräfte, Spannungen und Deformation ausgelöst werden, beruht der Verschleißmechanismus Adhäsion auf stofflichen Wechselwirkungen [182]. Bedingt durch lokale Pressungen an den einzelnen Oberflächenrauheitshügeln werden die schützenden Deckschichten durchbrochen und lokale Grenzflächenbindungen entstehen [183]. Die sogenannten Kaltverschweißungen können höhere Festigkeiten aufweisen als die ursprüngliche Matrix der beiden Kontaktpartner. Material wird somit aus der Oberfläche herausgerissen und geht an den Kontaktpartner über. In der Oberfläche des einen Kontaktpartners entsteht dadurch ein Loch und bei dem anderen eine Anhäufung [170].

Tribochemische Reaktionen

Tribochemische Reaktionen sind chemische Reaktionen in einem tribologischen Systems zwischen dem Grundkörper, dem Gegenkörper, dem Zwischenmedium und/oder dem Umgebungsmedium [166, 184]. Die Reaktionen sind thermisch und mechanisch aktivierte Vorgänge. Diese werden durch thermisch induzierte Energie und plastische Verformung begünstigt, da die chemische Reaktionsbereitschaft der Mikrokontaktstellen erhöht wird [166]. Tribooxidation ist eine relevante und häufig auftretende Reaktion, die zwischen einem Festkörper und dem umgebenden Sauerstoff stattfindet. Hier bewirkt besonders plastische Verformung eine Steigerung der Reaktionsbereitschaft und damit auch der Oxidschichtdicke im Vergleich zu nicht verformten Oberflächen [170]. Mikrokontaktstellen von metallischen Kontaktpartnern bieten eine geeignete Oberfläche für Oxidationen, wodurch sich dort Oxidinseln ausbilden können [166]. An den Oxidinseln wird der Abbau von mechanischen Spannungen erschwert. Die Oxidschicht lässt lediglich eine geringe plastische Verformung zu, somit spröde ist und bereits bei geringen Spannungen, in Bezug auf die erreichbaren Spannungen des Grundwerkstoffs, ein Ausbrechen der tribologisch veränderten Grenzschichten erfolgt [184]. Vorwiegend begünstigen tribochemische Reaktionen den Verschleiß und sind zu unterbinden. In wenigen Fällen trägt diese jedoch zum Verschleißschutz bei. Durch ausgewählte Wärmebehandlungen können zweckgerichtete Oxidschichten erzeugt werden, die als Schutz- oder Trennfilm fungieren. Mithilfe dieser Schutzschichten kann weitere unkontrollierte Oxidation vermieden oder die Reibung zwischen den Reibungspartnern vermindert werden [185, 186].

2.6.3 Verschleißbeständigkeit gegen Abrasion

Da in der vorliegenden Arbeit vorwiegend Abrasionsverschleiß bei Werkzeugstählen auftritt, wird im Folgenden näher auf die Verschleißbeständigkeit gegen Abrasion von Werkzeugstählen eingegangen. Für eine erhöhte Verschleißbeständigkeit gegen Abrasion ist bekannt, dass eine hohe Härte des Grundkörpers die Furchentiefe reduziert. Aus einer geringeren Furchentiefe resultiert dementsprechend weniger Verschleiß bzw. Materialabtrag. Wie bereits in Kapitel 2.2 angemerkt, sind in einer martensitischen Matrix eingebettete Hartphasen eine wirksame Möglichkeit Verschleiß, zu reduzieren [166, 187]. Entscheidend ist die Kombination aus Härte und Zähigkeit der Matrix und der Hartphasentyp, die Hartphasengröße und deren Verteilung [51].

Um den Einfluss des Hartphasentyps, der Hartphasengröße und der Hartphasenverteilung auf die Verschleißbeständigkeit von Werkzeugstählen zu verstehen, wird zuerst darauf eingegangen, wie Karbide in Werkzeugstählen gebildet werden. Durch die chemische Beschaffenheit und die Eigenschaften der Karbide können diese als keramische Verstärkung im Gefüge von Kaltarbeits- und Schnellarbeitsstählen verstanden werden [51]. Metallische Hartphasen werden entsprechend der vorliegenden Strukturformel in Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung mit M_aX_b bezeichnet [188]. Unterschieden werden

kann zwischen Primärkarbiden, eutektischen Karbiden und Sekundärkarbiden. Primärkarbide bilden sich direkt aus der Schmelze und bestehen vorwiegend aus stabileren, karbidbildenden Elementen wie z. B. V oder Nb. Während die Karbide in der Schmelze wachsen, nehmen diese eine Form mit niedriger Oberflächenenergie an. Die primären Karbide bilden nicht den größten volumenmäßigen Anteil von Karbiden, da noch ein großer Anteil an Schmelze mit ausreichendem C-Gehalt und LE zur Bildung von weiteren Hartphasen vorhanden ist. Eutektische Karbide bilden sich während der Abkühlung durch eine eutektische Reaktion, die am Beispiel des X153CrMoV12 (1.2379) erläutert wird. Mit dem Beginn der Erstarrung bildet sich die Phase Austenit aus der Schmelze. Da die Löslichkeit des Kohlenstoffs und der Legierungselemente in der Schmelze deutlich höher ist, reichert sich die Restschmelze mit zunehmender Erstarrung an. Mit weiterer Unterkühlung kommt es in der angereicherten Schmelze zu einer eutektischen Reaktion, sodass die verbliebene Restschmelze in ein Mischgefüge aus Austenit und Karbiden umgewandelt wird. Dieses weist in der Regel eine lamellare Morphologie auf. Die eutektischen Karbide sind Cr-reiche Karbide vom Typ M_7C_3 [189]. Die einzelnen Karbidtypen und deren Eigenschaften sind bereits in dem Kapitel 2.2 vorgestellt worden, sodass diese nicht weiter erläutert werden.

Neben dem Karbidtyp und deren Menge hängt die Verschleißbeständigkeit von der Karbidverteilung ab. Die endgültige Verteilung ergibt sich aus der Verformung der Mikrostruktur des Gusszustandes durch Warm Schmieden oder Warmwalzen. Die Mikrostruktur des Gusszustandes wird durch die Abkühlgeschwindigkeit beeinflusst. Mit höheren Abkühlgeschwindigkeiten bilden sich feinere Mikrostrukturen aus. Hierbei ist zu beachten, dass die Mikrostruktur auch innerhalb eines Gussblocks durch die unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten vom Rand zum Kern variiert [190]. Gegenüber der schmelzmetallurgischen Route können durch die pulvermetallurgische Route feine Gefüge und eine homogene Karbidverteilung erreicht werden [61, 191]. In dieser Arbeit wurden lediglich schmelzmetallurgisch hergestellte Werkzeugstähle betrachtet, sodass auf die PM-Stähle nicht weiter eingegangen wird. Während der Warmumformungsvorgänge werden die eutektischen Karbide kontinuierlich aufgebrochen. Da die Hartphasen der Bewegung der Metallmatrix nicht folgen können, werden diese ständig fragmentiert. Das um die Metallzellen liegende eutektische Karbidnetzwerk wird somit linear entlang der Hauptumformrichtung ausgerichtet und die sogenannte Karbidzeiligkeit entsteht [58]. Die Zähigkeit des Werkstoffs wird infolge des Verformungsprozesses verbessert, da die Karbidnetzwerke aufgebrochen werden. Durch die entstandene Karbidzeiligkeit werden die Eigenschaften der Werkzeugstähle jedoch richtungsabhängig. Beispielsweise ist die Rissausbreitung entlang der ausgerichteten Karbide geringer als senkrecht zu der Karbidzeiligkeit [191].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Verschleißbeständigkeit von drei Hauptfaktoren abhängt. Diese drei Hauptfaktoren sind die Menge, die Größe und die Homogenität der Hartphasen. In Abbildung 9 ist der Einfluss der einzelnen Hauptfaktoren auf das Verschleißverhalten gegen Abrasion

schematisch dargestellt. Bei zu kleinen Karbiden dringt der abrasive Gegenkörper tiefer in die Materialoberfläche ein (Abb. 9a), was den Verschleiß bzw. Materialabtrag erhöht. Sind die Hartphasen jedoch größer, wie es beim Fall in Abbildung 9b ist, kann der Verschleiß reduziert werden. Der Gegenkörper dringt nicht tief in die Materialoberfläche hinein. Sind die größeren Karbide allerdings nicht homogen verteilt, kann der Gegenkörper an karbidfreien Bereichen tiefer in die Matrix eindringen und partiell den Materialabtrag erhöhen (Abb. 9c) [45].

2.7 Wärmeleitfähigkeit von Metallen

Die typischen Eigenschaften von Metallen wie elektrische und thermische Leitfähigkeit werden durch beweglichen Valenzelektronen im Metallgitter ermöglicht [192, 193]. Der Transport von thermischer Energie in metallischen Festkörpern wird durch die Phononen der Gitterschwingungen und der Bewegung der freien Valenzelektronen bewirkt, in ferromagnetischen Werkstoffen zusätzlich durch Magnonen. Diese Mechanismen sind voneinander unabhängig und existieren parallel [194, 195]. Die gesamte Wärmeleitfähigkeit kann daher aus den Anteilen der Gitterschwingungen und der Elektronen zur gesamten Wärmeleitfähigkeit nach Formel 2.5 addiert werden.

$$\lambda = \lambda_g + \lambda_e + \lambda_m \quad (2.5)$$

In metallischen Werkstoffen erfolgt die Wärmeleitung vorwiegend über den elektronischen Anteil der Wärmeleitfähigkeit λ_e [193]. Zwischen dem elektronischen Anteil der Wärmeleitfähigkeit λ_e und der elektrische Leitfähigkeit σ von Metallen besteht ein Zusammenhang [196]. Dieser wird mit der angegebene Beziehung (Formel 2.6) von Wiedemann, Franz und Lorenz beschrieben [195, 197–199]. Die Lorenz-Zahl L ist eine materialspezifische und temperaturabhängige Größe, die über den Seebeck-Koeffizienten bestimmt werden kann [192]. Die physikalischen Grundlagen der Wärmeleitfähigkeit und deren Bestimmung sind hinreichend in der Literatur beschrieben, weshalb diese nicht weiter erläutert werden [192–194, 197, 200, 201]. Im Folgenden wird der Einfluss der Mikrostruktur auf die Wärmeleitfähigkeit und die Relevanz der Wärmeleitfähigkeit in technischen Prozessen beschrieben, da die Materialeigenschaften Einfluss auf das Wiederwenden von Werkstoffen in einer Kreislaufwirtschaft haben. Eigenschaften wie die Leitfähigkeit, die Festigkeit und die Korrosionsbeständigkeit sind entscheidend dafür, wie Werkstoffe in der Kreislaufwirtschaft wiederverwendet und erneut eingesetzt werden können. Beispielsweise kann ein hoher Grad an Korrosionsbeständigkeit die Langlebigkeit eines Materials in bestimmten Umgebungen sicherstellen, während eine gute Leitfähigkeit für die erneute Nutzung in elektrischen Anwendungen wesentlich ist. Diese Eigenschaften beeinflussen nicht nur die Wiederverwendbarkeit, sondern auch die Methoden und Prozesse, die für das Wiederverwenden benö-

tigt werden.

$$\frac{\lambda}{\sigma T} = L \quad (2.6)$$

Die höchste Wärmeleitfähigkeit von Eisenbasislegierung weist reines Eisen auf [202–204]. Durch die Zugabe von Legierungselementen zur Herstellung von Legierungssystemen verringert sich die Wärmeleitfähigkeit, wobei die Höhe der Reduzierung vom Legierungselement abhängig ist [205]. Zu den Legierungselementen, die die Wärmeleitfähigkeit in Stahl signifikant verringern, zählen Cr und Si [202, 203]. Je höher der gelöste Gehalt der Legierungselemente in der Matrix ist, desto niedriger ist die Wärmeleitfähigkeit [206, 207]. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Bildung von Ausscheidungen die Wärmeleitfähigkeit gegenüber dem Lösungszustand ansteigt [207–209]. Hierbei wird die gesamte Wärmeleitfähigkeit des Stahls über die Leitfähigkeit der Matrix und die Leitfähigkeit der Ausscheidungen beeinflusst. Bekannt ist ebenfalls, dass Mo-reiche Karbide eine höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen als Cr-reiche Karbide [210–212]. Die signifikante Reduzierung der Leitfähigkeit durch Cr im Mischkristall ist darauf zurückzuführen, dass Cr die Beweglichkeit von Elektronen reduziert und somit der elektronische Anteil der Wärmeleitfähigkeit sinkt [211]. Neben dem Legierungstyp und der Verteilung, ob diese gelöst oder ausgeschiedenen in der Mikrostruktur vorliegen, hat die enthaltene Menge der Legierungselemente ebenfalls Einfluss auf die Leitfähigkeit. Bei niedriglegierten Stählen sinkt die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Messtemperatur. Bei hochlegierten Stählen, nimmt die Wärmeleitfähigkeit in vielen Fällen mit steigender Messtemperatur zu [205, 213]. Die sich ausbildende Matrix hat ebenfalls Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Eine martensitische Matrix weist eine höhere Leitfähigkeit auf als eine austenitische Matrix [209]. Ebenso kann die Wärmeleitfähigkeit einer martensitischen Matrix durch Anlassvorgänge erhöht werden, da sich das verzerrte Metallgitter entspannt und Ausscheidungen gebildet werden [214, 215]. Richtungsabhängigkeit von Karbiden in Werkzeugstählen (Kap. 2.2) und deren Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit wird bisher kaum in der Literatur erwähnt. Für die Einführung einer Kreislaufwirtschaft ist das Wissen über die Eigenschaften der Werkstoffe jedoch von Relevanz. Der Einfluss der geänderten Materialeigenschaften auf die Funktionalität des neuen Produktes oder die geänderte Funktion muss analysiert werden.

2.7.1 Wärmeleitfähigkeit in technischen Prozessen

Die Wärmeleitfähigkeit von Metallen ist in technischen Prozessen von Relevanz. In elektrischen Geräten ist die Wärmeabfuhr von wichtigen Bauteilen notwendig, da eine Überhitzung dieser Bauteile die Funktionsfähigkeit beeinträchtigen kann oder für einen kompletten Ausfall sorgt [216, 217]. Um die Funktionalität zu gewährleisten, müssen Materialien verwendet werden, die eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweisen [218]. Dadurch kann die entstandene Wärme schnell von der Wärmequelle abgeführt

werden. Demgegenüber stehen Prozesse, bei denen eine geringe Wärmeleitfähigkeit der Werkstoffe notwendig ist. Beispielsweise werden Turbinenschaufeln mit keramischen Wärmedammschichten überzogen. Hierdurch können Gasturbinen mit höheren Heißgastemperaturen betrieben werden, da die niedrige Wärmeleitfähigkeit der keramischen Schicht den eintretenden Wärmestrom in die Turbinenschaufeln reduziert [219]. Die Wärmeleitfähigkeit von Werkzeugstählen, besonders bei martensitisch härtbaren Stählen, ist bisher kaum betrachtet worden. Jedoch kann eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit dieser Stähle längere Standzeiten von Werkzeugen ermöglichen, was ein Ziel der Kreislaufwirtschaft ist (Kap. 2.1). Im Bereich der Warmumformwerkzeuge werden Warmarbeitsstähle mit hohen Wärmeleitfähigkeiten eingesetzt, um den prozessbedingten adhäsiven Verschleiß zu minimieren [220]. Ähnlich wie bei den zuvor genannten elektronischen Bauteilen, die durch eine Überhitzung Funktionsschädigungen erfahren könnten, verhalten sich Werkzeuge bei erhöhten Temperaturen. Durch die schnelle und gezielte Abfuhr der Prozesswärme kann thermischer Ermüdung entgegengewirkt werden [220].

3 Versuchsdurchführung

3.1 Thermodynamische Gleichgewichtsberechnungen

Für die Erstellung von Phasendiagrammen und Phasenmengenschaubilder wurde die CALPHAD-Methode verwendet. Die thermodynamischen Berechnungen wurden mit der Software Thermo-Calc der Version 2020b unter Verwendung der Datenbanken TCFE9.1 und TCFE10.1 für Eisenbasiswerkstoffe durchgeführt. Die verwendeten chemischen Zusammensetzungen sind Kapitel 4.1 zu entnehmen. Die Berechnungen erfolgten in einem Temperaturbereich von 100 °C bis 1500 °C. Alle Berechnungen wurden für eine Stoffmenge von $n = 1$ und einem Umgebungsdruck von $p_u = 101\,325$ Pa durchgeführt. Die Berechnungen erfolgten ohne Berücksichtigung der Phasen Gas, Diamant, Graphit, z-Phase, p-Phase und g-Phase.

3.2 Chemische Analyse

Das Funkenspektrometer ARL 3460B der Firma Thermo AL wurde verwendet, um die globale chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffe mittels optischer Emissionsspektrometrie zu analysieren. Für die Messungen wurden die Proben mit grobem Schleifpapier der Körnung P80 trocken geschliffen, sodass eine möglichst große Oberfläche zum Verdampfen existierte, und anschließend mit Druckluft gereinigt. Bei den Messungen wurde das vordefinierte Chrom-Eisen-Analyseprogramm des Funkenspektrometers verwendet. Die Validierung der durchgeführten Messungen erfolgte durch das Messen von verschiedenen Referenzproben. Hierzu wurden Referenzproben gewählt, die vergleichbare Gehalte an den vorhandenen Legierungselementen beinhalten. Pro Werkstoff und Referenzprobe wurden mindestens fünf Messungen zur statischen Sicherheit durchgeführt.

3.3 Proben- und Halbzeugentnahme

Für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Circular Economy Konzept wurden aus dem zur Verfügung stehenden Sekundärmaterial verschiedene Proben und Halbzeuge entnommen. Die Proben

dienten für werkstoffkundliche Analysen und die Halbzeuge wurden zu Repurpose-Produkten weiterverarbeitet.

3.3.1 Wasserstrahlschneiden

Für die Entnahme der Proben und der Halbzeuge mittels Wasserstrahlschneiden wurde die Abrasiv-Wasserstrahl-Schneidmaschine 60120 der Firma OMAX® verwendet. Durch die benötigten Einstellungen, Materialstärke und Materialhärte über das zu schneidende Material, konnte lediglich ein Parametersatz für das Wasserstrahlabrasivschneiden ausgewählt werden. Der Druck des Wasserstrahls betrug 3600 bar bei einer Schneidgeschwindigkeit von 248 mm min^{-1} . Als Abrasive, die dem Wasserstrahl beigemischt wurden, ist Granatsand mit der Körnung 80 Mesh verwendet worden.

3.3.2 Laserschneiden

Für die Entnahme der Proben und Rohlinge durch Laserschneiden wurde die CO₂-Laserschneidanlage TLF 3800 turbo der Firma Trumpf verwendet. Als Erstes wurde eine Parameterstudie anhand eines wategeschliffenen Maschinenkreismessers mit einem Durchmesser von 1000 µm durchgeführt. In Tabelle 2 sind die Parameter der verwendeten Materialkarte des Werkstoffs X153CrMoV12 (1.2379) für die jeweiligen Materialstärken aufgelistet. In Abbildung 12a ist die schematische Anordnung der Proben für die Parameterstudie dargestellt. Die Proben für die Laserleistung 6 mm, 8 mm und 10 mm weisen eine Gesamtlänge von 365 mm auf. Diese beginnen bei einer Materialstärke von 6 mm im inneren Flanschbereich des Maschinenkreismessers und enden am äußeren Rand bei einer Materialstärke von unter einem Millimeter. Für die Laserleistung der Materialstärke 2 mm und 4 mm wurden die Proben so gewählt, dass die Probe an der entsprechenden Materialstärke begann und ebenfalls bis zum äußeren Rand ausgeschnitten wurde.

Neben der Parameterstudie wurden verschiedene Werkzeugrohlinge durch Laserschneiden aus den Maschinenkreismessern herausgetrennt. Hierfür wurde jeweils die Materialkarte mit den dazugehörigen Parametern der entsprechend dicksten Materialstärke des verwendeten Maschinenkreismessers verwendet. In Abbildung 12b ist exemplarisch ein Schnittmuster mit entnommenen Proben und Halbzeugen dargestellt.

3.4 Metallographie

3.4.1 Stationäre Metallographie

Für die mikrostrukturellen Analysen der verwendeten Werkstoffe wurden Längs- und Querschliffe angefertigt. Hierzu wurden mit der Präzisionstrennmaschine Mecatome T210 der Firma Presi Pro-

benstücke aus den zur Verfügung stehenden Werkstoffen herausgetrennt. Diese Probenstücke wurden anschließend mit der Einbettpresse Mecapress 3 der Firma Presi warm elektrisch leitend eingebettet. Für die Erzeugung kratzerfreier Oberflächen wurde der Polierautomat Mecatech 234 der Firma Presi verwendet. Hierzu wurden die Proben mittels SiC-Schleifpapier mit einer Körnung von P80 bis zu einer Krönung von P1500 geschliffen. Anschließend wurden die Proben auf Gewebetüchern mit Diamantensuspension in absteigender Körnung von 6 µm, 3 µm und 1 µm unter Verwendung von Schleifschmiermittel auf Ethanolbasis poliert. Für das Kontrastieren des Gefüges wurden die Proben anschließend mit V2A-Beize oder 3-prozentiger Salpetersäure (HNO_3), auch Nital genannt, geätzt. Die V2A-Beize bestand aus 100 mL destilliertem Wasser, 100 mL konzentrierter Salzsäure, 10 mL konzentrierter Salpetersäure und 2 mL Vogels Sparbeize. Die verwendete Nitalsäure bestand aus 97 mL Ethanol und 3 mL Salpetersäure. Alle Ätzungen wurden bei Raumtemperatur durchgeführt.

3.4.2 Vor-Ort-Metallographie

Um die Rohlinge für die Repurpose-Werkzeuge in definierter Ausrichtung aus den Maschinenkreismessern entnehmen zu können, wurde eine Vor-Ort-Metallographie entwickelt, sodass die Vorzugsrichtung der Karbide vor der Probenentnahme und ohne ein ausgestattetes Metallografielabor identifiziert werden kann. Hierzu wurde ein 4×5 großes Schachbrettmuster als Versuchsfläche auf einem Maschinenkreismesser mittels einer Anreißnadel angezeichnet. Die einzelnen Felder weisen eine Größe von 5 cm x 5 cm auf. Innerhalb dieser 20 definierten Versuchsflächen wurde durch Schleifen, Polieren, Variation des Ätzmittels und den Ätzzeiten unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheiten erzeugt. Unterschieden wurde in unbehandelte, geschliffene und polierte Versuchsoberflächen. Zum Schleifen wurde SiC-Schleifpapiere in den Mesh-Körnungen P80, P320, P500, P1000 und P1500 verwendet. Für das Polieren ist Diamantensuspension in den Abstufungen 6 µm, 3 µm und 1 µm verwendet worden. Das Schleifen erfolgte händisch und für das Polieren ist ein Dremel verwendet worden. Als Ätzmittel dienen V2A-Beize und Salpetersäure (HNO_3). Die Zusammensetzungen sind Kapitel 3.4.1 zu entnehmen. Hierzu wurde ein Stück Watte mit dem entsprechenden Ätzmittel getränkt und auf eines der vorbereiteten Versuchsfelder gelegt. Die zuvor aufgezeigte Abfolge der möglichen Präparationsschritte wurden bis zu der gewünschten Zielpräparation durchgeführt. Zwischen jedem Präparationsschritt wurde die behandelte Fläche mit Ethanol gereinigt. In Tabelle 1 sind den jeweiligen Versuchsfeldern die gewünschten Zielpräparationen zugeordnet.

Für die Bestimmung der Karbidzeitigkeit wurde nach Erreichen der gewünschten Zielpräparationen ein Negativabdruck der Versuchsoberflächen genommen. Hierzu wurde eine 35 µm dicke Celluloseacetatfolie verwendet. Diese ist für eine Sekunde in Aceton gehalten und anschließend auf eine der vorbereiteten Flächen gelegt worden. Nachdem das Aceton verdampft und die Celluloseacetatfolie getrocknet war,

wurde diese mit Hilfe einer Pinzette von der Versuchsoberfläche entfernt und mit der negativen Abdruckseite nach oben auf einen Glasobjektträger gelegt. Für die Fixierung der Acetatfolie sind zwei Klebestreifen am linken und rechten Rand angebracht worden. Die Identifikation der Vorzugrichtung der Karbide ist anhand des Acetatfolienabdrucks unter dem Auflichtmikroskop DM2700M der Firma Leica im Hellfeldmodus nach Kapitel 3.5.2 erfolgt.

3.4.3 Elektrolytisches Abtragen

Für das elektrolytische Abtragen eines definierten Bereiches wurde die Probenoberfläche so vorbereitet, dass umliegende Bereiche nicht mit dem eingesetzten Elektrolyt in Kontakt kommen. Anschließend wurde ein mit Elektrolyt getränktes Wattestück auf die abzutragende Oberfläche gelegt. Das Elektrolyt setzte sich wie folgt zusammen: 600 mL Glycerin, 1150 mL H_2O , 250 g und NH_4Cl . Für das Abtragen ist die Probe (Anode) und eine zusätzliche Kathode mit einer externen Spannungsquelle verbunden worden. Die Stromstärke lag bei 0,7 A, sodass bei der gegebenen Fläche von 20 mm ein Abtrag von $0,6 \mu\text{m s}^{-1}$ erzielt wurde. Der exakte Abtrag ist nach jedem Ätzschritt mithilfe einer Messuhr überprüft worden.

3.5 Bildgebende Verfahren

3.5.1 Stereomikroskopie

Um makroskopische Probenbereiche mit einer höheren Vergrößerung analysieren zu können, ist das Stereomikroskop des Types S6D der Firma Leica verwendet worden. Die Aufnahmen erfolgten zwischen 6,3-facher und 40-facher Vergrößerung. Für die Verarbeitung der Aufnahmen wurde die Analyse-Software Leica Application Suite (LAS) in der Version 4.6.2 verwendet.

3.5.2 Lichtmikroskopie

Die kontrastierten Gefüge der verwendeten Proben wurden an dem Auflichtmikroskop DM2700M der Firma Leica aufgenommen. Die Aufnahmen erfolgten im Hellfeld-Modus zwischen 50- und 1000-facher Vergrößerung. Für die Verarbeitung der Aufnahmen wurde die Analyse-Software Leica Application Suite (LAS) in der Version 4.6.2 verwendet.

3.5.3 Rasterelektronenmikroskopie

Für rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen wurde das Rasterelektronenmikroskop (REM) vom Typ Vega 3 SBH der Firma TESCAN verwendet. Die Aufnahmen erfolgten durch Detektion von

Sekundär- (SE) und Rückstreuелектronen (BSE). Verwendet wurden Beschleunigungsspannungen zwischen 15 kV und 20 kV bei Arbeitsabständen von 8 mm bis 15 mm. Die Aufnahmen erfolgten von 100-facher bis 10000-facher Vergrößerung.

3.5.4 Konfokales Laserrastermikroskop

An einem konfokalen 3D Laserscanning-Mikroskop VK-X250 der Firma Keyence wurden Verschleißspuren dreidimensional erfasst. Mithilfe des Mikroskops wurden hochpräzise dreidimensionale Aufnahmen erzeugt. Die Auswertung der aufgenommenen Bilder erfolgte in der Software MultiFileAnalyzer.

3.5.5 Quantitative Bildanalyse

Für die Bestimmung des Karbidgehaltes der verwendeten Werkstoffe wurde an licht- und rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen eine quantitative Bildanalyse durchgeführt. Für die Analyse wurde die Software ImageJ in der Version v1.53k verwendet. Die Quantifizierung erfolgte an lichtmikroskopischen Aufnahmen zwischen 200-facher und 1000-facher Vergrößerung. Bei den REM-Aufnahmen wurden Vergrößerungen zwischen 500-facher und 2000-facher gewählt. Die Aufnahmen wurden mittels ImageJ binarisiert, indem über Histogramme die genaue Zuordnung von Pixeln zu Schwarz-Weiß-Werten möglich war. Anschließend wurde die Fläche der schwarzen Pixel berechnet, da diese den Karbiden entsprach.

3.6 Phasenanalyse

3.6.1 Röntgendiffraktometrie

Röntgendiffraktometrie (XRD) wurde für die Bestimmung einzelner Phasen am Röntgendiffraktometer D2 Phaser der Firma Bruker durchgeführt. Die Cu-Röntgenstrahlenquelle und der LynxEye-Si-Streifendetektor sind nach dem Bragg-Brentano-Fokussierungsprinzip im Winkel von 2θ angeordnet. Die Messungen erfolgten bei Raumtemperatur bei einer Hochspannung von 30 kV und einer Stromstärke von 10 mA. Es wurde ein Winkelbereich von 30° bis 70° bei einer Schrittweite von $0,02^\circ$ und einer Scanzeit von vier Sekunden gemessen. Die Phasenanalyse der gemessenen Reflexe erfolgte qualitativ in der Software DIFFRAC.EVA durch das Abgleichen der erzeugten Diffraktogramme mit dem Referenzdatensatz der ICDD-Datenbank PDF-02-2016.

3.6.2 Energiedispersive Röntgenanalyse

Für die energiedispersive Röntgenspektrometrie (engl. energy dispersive X-ray spectrometry, EDX) wurde der EDX-Detektor XFlash 5030 der Firma Bruker verwendet. Für die Analyse der lokalen chemischen Zusammensetzungen der metallischen Matrix und der Ausscheidungen wurden Punktscans bei einem Arbeitsabstand von 15 mm durchgeführt. Die Quantifizierung der Elemente erfolgte nach ZAF-Korrektur der Signalsteuerung. Die Elemente Kohlenstoff und Sauerstoff wurden bei der Quantifizierung nicht berücksichtigt, jedoch bei der Detektion in ihrer Entfaltung.

3.7 Mechanische Eigenschaften

3.7.1 Schlagbiegeversuche

Die Bruchzähigkeit der verwendeten Werkstoffe wurde an einem 300 J Pendelhammer nach DIN EN ISO 148-1 durchgeführt [221]. Unter der Voraussetzung der zur Verfügung stehenden Abmaße des Probenmaterials, wurden die Versuche mit ungekerbten Untermaß-Proben von 5 mm x 8 mm mit einem Prüfquerschnitt von 40 mm² verwendet. Pro Werkstoff wurden insgesamt fünf Proben getestet, aus denen anschließend die mittlere benötigte Schlagarbeit gemittelt wurde. Aus dem Werkstoff 75Cr1 (1.2003) konnten aufgrund der Abmaße des Rohmaterials keine Schlagproben entnommen werden.

3.7.2 Härtemessungen

Härtemessungen an den betrachteten Werkstoffen erfolgten sowohl nach dem in DIN EN ISO 6507 definierten Härteprüfverfahren nach Vickers und nach dem in DIN EN ISO 6508 definierten Härteprüfverfahren nach Rockwell [222–225]. Für die Härteprüfung nach Vickers wurde der vollautomatisierte Härteprüfer Carat 930 der Firma ATM verwendet. Gemessen wurde mit verschiedenen Prüflasten zwischen 0,49 N (HV0,05) und 294,2 N (HV30), sodass Mikro-, Kleinlast- und Makrohärten bestimmt werden konnten. Der Prüfkörper war eine gleichseitige Diamantpyramide mit einem Öffnungswinkel von 136°. Der Prüfkörper wurde jeweils für zehn Sekunden mit der entsprechenden Prüfkraft in das Material gedrückt und anschließend entlastet. Die zurückgebliebene Diagonale des Härteeindrucks wurde anschließend durch das integrierte Auflichtmikroskop mit 2,5-fach, 10-fach oder 50-facher Vergrößerung vermessen. Die gemessene Diagonale d wird über die Gleichung 3.1 in den jeweiligen Härtewert umgerechnet [222–224].

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (3.1)$$

Für die Härtemessungen nach Rockwell wurde der Rockwell-Härteprüfer Duramin-160 der Firma

Struers verwendet. Im Gegensatz zu dem optischen Verfahren nach Vickers ist das Verfahren nach Rockwell ein Tiefendifferenzverfahren. Hierbei wird die verbleibende Eindringtiefe gemessen. Hierbei wurde eine Vorkraft F_0 von 98,07 N bis zur Eindringtiefe h_0 gedrückt. Anschließend wurde der Eindringkörper mit der Hauptkraft (Prüfzusatzkraft + Vorkraft) von 1471 N bis zur maximalen Eindringtiefe h_1 für sechs Sekunden gedrückt. Abschließend wurde die Prüfzusatzkraft wieder entfernt, sodass sich der Eindringkörper um den elastischen Anteil der Eindringtiefe an der Prüfgesamtkraft zurückbewegte. Mithilfe der verbleibenden Eindringtiefe h lässt sich die Rockwellhärte HR unter Zuhilfenahme der Rockwellskala berechnen [225]. Der durchgeführte Prüfzyklus und die Auswertung erfolgte bei dem verwendeten Härteprüfer vollautomatisch.

3.7.3 Eigenspannungsmessungen

Eigenspannungsmessungen erfolgten mit dem Gerät μ -x360n der Firma Pulstec. Der Tabelle 3 sind die verwendeten Parameter der Messungen zu entnehmen. Für die Messungen wurde der kleinstmögliche Kollimator mit einem Durchmesser von 0,3 mm verwendet. Gemessen wurden die Eigenspannungen in radialer und tangentialer Richtung. Um die Ergebnisse von Schubspannungen zu bereinigen, mussten die Messungen in positive und negative x- und y-Richtung durchgeführt werden. Anschließend erfolgte die Bildung eines arithmetischen Mittelwerts aus den beiden Werten, um die reine Normalspannungskomponente σ zu erhalten. Der mathematische Hintergrund dieses Vorgehens wird von MATTHES in [226] erläutert und soll hier nicht weiter beschrieben werden. Die Eigenspannungsmessungen erfolgten an den Walzringen, die durch das Spannungswalzen in die Maschinenkreismesser eingebracht werden. Dazu wurde der Eigenspannungszustand im Bereich der Walzspur an der Oberfläche und in der Tiefe von bis zu 250 μ m analysiert. Hierzu wurden die oberen Materialschichten schrittweise elektrolytisch abgetragen (Kap. 3.4.3).

3.8 Tribologische Untersuchungen

3.8.1 Ritzversuch

Die Einzelritzversuche wurden an allen in dieser Arbeit verwendeten Werkstoffen und Karbidausrichtungen durchgeführt. Hierzu wurden aus den in Kapitel 4.2 beschriebenen Werkzeugen Proben entnommen. In Abbildung 13 sind die Probenentnahme und die für die Einzelritzversuche verwendete Querschnittsfläche anhand der Drechselwerkzeuge exemplarisch dargestellt. Die Querschnittsflächen der Werkzeuge wurden für die Verschleißversuche verwendet, da diese im späteren Einsatz dem Verschleiß ausgesetzt ist.

Die Einzelritzversuche wurden durch einen Zweikörper-Abriebtest mit einem sphärisch-konischen Diamanteindringkörper (Radius 10 µm, Winkel 60°) von Anton Paar auf einem CSEM Nano-Scratch Tester durchgeführt. Das Prüfgerät ist mit einem Ausleger (HL-318, Steifigkeit: 8,76 x 104 mN µm⁻¹, Normalkraft, Fn-Verschiebungskoeffizient Dz bei 100 µm: 11 180 µm V⁻¹) ausgestattet und hat einen Lastbereich von 0,88 mN bis 1600 mN. In den durchgeführten Versuchen, welche unter Luftbedingungen bei Raumtemperatur stattfanden, wurde eine ansteigende Last von 1 mN bis 1000 mN auf eine Ritzlänge von 1000 µm aufgebracht. Die auf die Diamantspitze ausgeübte Normallast nahm zu, während sich die Spitze mit einer Geschwindigkeit von 180 µm min⁻¹ bewegte. Die Seitenkräfte, die auf die Spitze des Eindringkörpers einwirkten, wurden mit Kraftsensoren aufgezeichnet, um den Reibungskoeffizienten (COF) gemäß Gleichung 3.2 zu bestimmen. Diese Seitenkraft ist der Widerstand der Probenoberfläche gegen die Querbewegung des Eindringkörpers mit der aufgebrachten Normallast.

$$F_T = F_N \cdot \mu \quad (3.2)$$

Die Dokumentation der Ritzspuren erfolgte mit dem in Kapitel 3.5.4 beschriebenen Laserscanning-Mikroskop. Für die Auswertung wurden die Querschnitte der Ritzspuren in einem Abstand von 100 µm über die gesamte Ritzlänge von einem Millimeter ausgewertet. In Abbildung 14 ist das Vorgehen dieser Auswertung dargestellt. Im ersten Schritt ist die obere Fläche, der sogenannte Aufwurf, gemessen worden. Anschließend erfolgte die Vermessung der unteren Fläche. Neben den Flächeninhalten wurde im dritten Schritt die Ritztiefe und abschließend die Ritzbreite vermessen. Mit den gemessenen Volumina ist der F_{ab} -Wert laut Formel 2.4 berechnet worden. An allen Proben wurden in 0°, 45° und 90° jeweils drei Ritze eingebracht. Die verschiedenen Ausrichtungen sind ebenfalls in Abbildung 13 dargestellt.

3.8.2 Drechselversuch

Um neben den in Kapitel 3.8.1 durchgeführten Scratch-Test die reale Anwendung der Repurpose-Drechselwerkzeuge mit den konventionell hergestellten Drechselwerkzeugen zu vergleichen, wurden definierte Drechselversuche durchgeführt. Die Verschleißversuche wurden an einer konventionellen Drehmaschine der Firma Schaerer vom Typ UD500 bei Raumtemperatur durchgeführt. Hierzu wurde ein 650 mm langes Rundholz aus Weißbuche mit einem Durchmesser von 80 mm in das Dreibackenfutter eingespannt und auf der gegenüberliegenden Seite mit der Zentrierspitze des Reitstocks gestützt. Für den Verschleißversuch wurden anstelle der normalen Wendeschneidplattenhaltern stattdessen die Drechselwerkzeuge in die Werkzeugaufnahme der Drehmaschine eingespannt. Die Spitze der Werkzeuge wurde auf der Höhe der Drehachse über die Einstellschrauben am Werkzeughalter ausgerichtet.

Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 15 dargestellt.

Mit jedem Drechselwerkzeug wurde insgesamt 100 Mal in das Rundholz eingestochen. Hierfür wurde an der Drehmaschine eine Drehzahl von 900 U/min mit einem linearen Vorschub von 0,51 mm/U eingestellt. Die Einschnitttiefe ist auf 30 mm begrenzt worden, sodass ein Holzkern von 20 mm verbleibt. Der erste Einschnitt erfolgte 50 mm entfernt von der am Reitstock fixierten Seite, wodurch an beiden Seiten des Drechselwerkzeugs Material anlag. Nach jedem Einstich wurde das Werkzeug händisch zurückgefahren und um die Materialstärke von 5 mm in Richtung des Dreibackenfutters verfahren. Durch die Überlagerung des Vorschubs des Werkzeugs und der Rotationsbewegung des Werkstücks ergab sich eine spiralförmige Schnittbewegung.

Für jedes Werkzeug erfolgte eine Temperaturaufzeichnung während des gesamten Verschleißversuches. Hierzu wurden vier Thermoelemente vom Typ K, die aufgrund der Ummantelung bis zu einer Temperatur von 400 °C werden können, auf der Drechselbeitelspitze aufgebracht. Die Positionen der einzelnen aufgeschweißten Thermoelemente ist in Abbildung 16 dargestellt. Für das Anschweißen der Thermoelemente wurde das Punktschweißgerät vom Typ Spot Welding Fixture 9061 verwendet. Tabelle 4 sind die verwendeten Parameter für die Stromstärke und die eingestellte Zeit zu entnehmen. Die Aufzeichnung der Temperatur erfolgte mittels einem Temperatur-Messgerätes vom TYP K204 der Firma VOLTcraft. Dieses bietet vier Kanäle zur Temperaturaufzeichnung mittels Fühler-Typ-K in einem Temperaturbereich von –200 °C bis 1370 °C und einer Auflösung von 0,1 °C [227]. Der Thermologger wurde so eingestellt, dass jede Sekunde ein Temperaturwert pro Thermoelement abgespeichert wurde. Nach den durchgeführten Verschleißversuchen wurde das Gerät mittels R-232-Schnittstelle an einen Computer angeschlossen und über die Software SE-309 die aufgezeichneten Daten als TXT-Datei exportiert und abgespeichert. Alle Werkzeuge wurden direkt vor und nach den Verschleißversuchen gewogen. Hierzu wurde die Präzisionswaage des Typ ABJ PCB1000-2 verwendet (Kap. 3.12). Die Drechselwerkzeuge wurden mit den aufgeschweißten Thermoelementen gewogen. Nach den Verschleißversuchen sind die Werkzeuge vor dem Wiegen mit Druckluft gesäubert worden, damit Verunreinigungen in Form von Holzspänen die Messung nicht verfälschen.

Der durch die Versuche auftretende Verschleiß wurde im Rahmen dieser Arbeit bildanalytisch ermittelt. Hierzu wurden die Werkzeugspitzen vor und nach den Versuchen in der Drauf- und Seitenansicht dokumentiert. Die Dokumentation erfolgte im Rasterelektronenmikroskop (Kap. 3.5.3) mit 39-facher und 150-facher Vergrößerung. Um die aufgenommenen Bilder auszuwerten, wurden die Programme Inkscape und ImageJ verwendet. In Abbildung 17 sind die durchgeführten Schritte der bildanalytischen Auswertung dargestellt. Im ersten Schritt wurde die Aufnahme mit 39-facher Vergrößerung in Inkscape importiert. Um die Werkzeugspitze nachzubilden, wurde eine neue Bildebene erstellt und an die Kontur der betrachtenden Werkzeugspitze wurden Tangenten angelegt. Im nächsten Schritt wurde die Aufnahme mit 39-facher Vergrößerung gegen die Aufnahme mit 150-facher Vergrößerung

ausgetauscht. Im Schnittpunkt der im ersten Schritt hinzugefügten Tangenten wurde ein Kreis mit einem definierten Radius von 10 mm hinzugefügt, wodurch eine kreisausschnittförmige Fläche entsteht. Diese Fläche bildet eine ideale Werkzeugspitze ab, die in der Realität nicht existiert und daher im Schritt drei auf die reale Werkzeugspitze angepasst wird. Hierzu wurde im Schritt drei die reale Spitze des Werkzeugs nachgezeichnet und die daraus resultierende Fläche eingefärbt. Im vierten Schritt wurde die eingefärbte Fläche exportiert und in das Programm ImageJ importiert. Hier wurde zuvor der Maßstab der Aufnahme mit 150-fachen Vergrößerung global gespeichert, sodass die Fläche direkt ausgewertet werden konnte. Hierzu wurde die Funktion „Analyse Particels“ verwendet, die den Flächeninhalt der Flächen berechnet. Dieses Vorgehen wurde mit allen Werkzeugspitzen vor und nach den Verschleißversuchen sowohl in der Drauf- als auch in der Seitenansicht durchgeführt. Abbildung 17 stellt das Vorgehen im Ausgangszustand und im verschlissenen Zustand anhand der Draufsicht eines Drechselwerkzeugs dar.

3.8.3 Schneidleistungstest

Neben den Verschleißversuchen der Drechselwerkzeuge sind die Repurpose-Hakenklingen ebenfalls in einem realen Verschleißversuch gegen die konventionellen Hakenklinge getestet worden. Hierzu wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der es ermöglicht, die Hakenklingen mit einer konstanten Geschwindigkeit durch ein Schnittgut zu ziehen. Für die Versuche wurde eine Universalprüfmaschine der Firma Zwick vom Typ Z050 verwendet. Mit der Materialprüfmaschine können Zug-, Druck- oder Torsionsversuche durchgeführt werden. Die obere Aufnahmebacke der Materialprüfmaschine ist fest am Rahmen verbaut. Die untere Aufnahmebacke ist mit einer Kraftmessdose auf einer Traverse befestigt, die in die entsprechenden Prüfrichtungen verfahren kann.

Versuchsaufbau

Für die Verschleißversuche der Hakenklinge wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der in die Materialprüfmaschine eingebaut worden ist. Dieser ist in Abbildung 18 dargestellt. Das Schneidzeug und das Schnittgut wurden so positioniert, dass der Schneidvorgang auf der Zugachse der Materialprüfmaschine lag. Hierfür wurde eine Aufnahme konstruiert, die an der oberen festen Aufnahmebacke montiert werden kann, um das Schnittgut aufzunehmen. Die Halterung des Schnittguts ist in Abbildung 18 vergrößert dargestellt. Über die Grundplatte wird die Halterung an der Aufnahmebacke der Materialprüfmaschine befestigt. Der Rahmen besteht aus zwei Hälften, die das Schnittgut über die gesamte Länge einspannen. Zusätzlich zu der Flächenpressung über die gesamte Länge des Schnittguts konnte dieses durch Madenschrauben fixiert werden. Über die Adapter, die den Rahmen an der Grundplatte befestigten, wurde der Winkel des Rahmens und somit des Schnittguts eingestellt. Für

die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Verschleißversuche wurde ein Winkel von 6° gewählt. Die Halterung des Schneidzeugs ist ebenfalls in Abbildung 18 vergrößert dargestellt. Diese verfügt ebenfalls über eine Grundplatte, die auf der verfahrbaren Aufnahmebacke festgeschraubt wurde. Auf dieser wurde die Aufnahme des Schnittguts fixiert. Die Bohrungen in der Aufnahme waren jeweils um 15° voneinander versetzt angeordnet, wodurch eine flexible Einstellung des Schneidzeugs ermöglicht wurde.

Schneidzeug und Schnittgut

Die Verschleißversuche wurden mit den im Kapitel 4.2.3 beschriebenen Hakenklingen durchgeführt. Hierzu wurde eine konventionelle Hakenklinge aus dem Werkstoff 75Cr1 (1.2003) und zwei Repurpose-Hakenklingen aus dem Werkstoff X153CrMoV12 (1.2379) mit der Karbidausrichtung längs und quer verwendet. Als Schnittgut wurde eine Bitumenbahn vom Typ V60 S4 grau beschiefert der Firma Quandt verwendet. Für die einzelnen Versuche wurden Probenstücke von 70 mm Breite und 210 mm Länge vorbereitet. In Abbildung 19a ist eins dieser Probenstücke dargestellt. Auf der Oberseite sind Schiefersplinter inhomogen verteilt. Jedes Probenstück wurde mit einer 10 mm tiefen Kerbe versehen, in der die Hakenklinge beim Start des Versuches positioniert wurde (siehe Abbildung 19b).

Parameter

Die für den Versuch verwendeten Parameter sind in Tabelle 6 dargestellt. Die Hakenklinge wurde mit einem Winkel von 0° in der Aufnahme eingespannt. Der Versuch startete bei an der oberen Traversenposition von 524 mm und Ende an der unteren Traversenposition von 287 mm. Durch den zurückgelegten Weg der Traverse von 237 mm, dem eingestellten Winkel der Hakenklinge und dem Winkel des Rahmens, ergab sich eine beanspruchte Länge der Schneide von 20 mm an der Hakenklinge. Insgesamt wurden 50 Zyklen mit jeder Hakenklinge durchgeführt und eine Prüfgeschwindigkeit von 3 mm/sec gewählt.

3.9 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Wärmeleitfähigkeit λ für die Werkstoffe 80CrV2 (1.2235), HS6-5-2C (1.3343) und X153CrMoV12 (1.2379) zwischen der Raumtemperatur (RT) und 500°C bestimmt. Hierzu wurden aus den in Kapitel 3.8.2 verwendeten Drechselwerkzeugen die benötigten Proben längs entnommen (Abb. 20a). Für das Messen der Temperaturleitfähigkeit sind die Proben quer zum Drechselbeitel entnommen worden (Abb. 20b). Dies war durch die benötigte Probengeometrie notwendig. Durch separates Messen der Dichte ρ , der Wärmekapazität c_p und der Temperaturleitfähigkeit α

wurde die Wärmeleitfähigkeit indirekt bestimmt. Für Messungen bei Raumtemperatur wird die Wärmeleitfähigkeit über:

$$\lambda = \rho \cdot c_p \cdot \alpha \quad (3.3)$$

bestimmt. Bei den Messungen über RT wurde die thermische Raumausdehnung β_{th} berücksichtigt. Die verwendeten Methoden für die Messung der laut Gleichung 3.3 benötigten Größen wird in den folgenden Abschnitten detaillierter beschrieben.

3.9.1 Messung der Dichte

Für die Bestimmung der Dichte ρ wurden alle Messungen mittels einer Feinmesswaage vom Typ CPA 225D der Firma Sartorius GmbH mit der Erweiterung des Dichtebestimmungssets YDK01 verwendet. Die Messungen fanden an den Proben für die Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstandes statt. Dabei wurde die Gewichts Differenz in Luft und in reinem Ethanol ermittelt. Die Dichte bei Raumtemperatur wurde unter Anwendung von Gleichung 3.4 mithilfe des archimedischen Prinzips berechnet. Hierbei ist m_L das Gewicht an Luft, m_F das Gewicht in Ethanol und ρ_F die Dichte des Ethanols. [228]

$$\rho = \frac{m_L \cdot [\rho_F - 0,0012 \text{ gcm}^{-3}]}{0,9983 \cdot [m_L - m_F]} \quad (3.4)$$

3.9.2 Messung der Temperaturleitfähigkeit

Die Messung der Temperaturleitfähigkeit α erfolgte durch die Laser-Flash-Methode am LFA-1000 der Firma Linseis Messgeräte GmbH. Bei der Laser-Flash-Methode wird eine Probenseite mittels eines Lasers erwärmt. Die Temperatur wird auf der Gegenseite der Probe kontaktlos gemessen, sodass ein von der Temperaturleitfähigkeit abhängiges Zeit-Temperatur-Profil entsteht. Für die Messungen wurden zylindrische Proben (Durchmesser: 10 mm, Höhe ca. 1 mm) verwendet (Abb. 20b). Hierzu wurden Adapterscheiben aus Graphit gefertigt, die in die bestehenden Probenhalter mit einem Durchmesser von 10 mm gelegt wurden. Alle Messungen erfolgten im Tieftemperaturbereich ($-100^\circ\text{C} < T < 550^\circ\text{C}$). Für die Messungen wurden alle Proben planparallel mittels SiC-Schleifpapier 1000 Mesh geschliffen und anschließend mit Graphit beschichtet. Der Ofenraum wurde vor jeder Messung evakuiert und anschließend mit Helium auf einen Überdruck von 0,3 bar geblutet. Insgesamt wurden pro Werkstoff und Karbidausrichtung drei Proben gemessen. Pro gewählter Messtemperatur erfolgten ebenfalls drei Messungen. Die erste Messung erfolgte bei 60°C und wurde mit einer Aufheizrate von 10 mK^{-1} je-

weils um 60 °C bis 300 °C erhöht. Des Weiteren wurden bei 400 °C und 500 °C jeweils drei Messungen durchgeführt.

3.9.3 Messung der spezifischen Wärmekapazität

Für die Messungen der isobaren spezifischen Wärmekapazität c_p wurde das Hochtemperatur Dynamische Differenz-Kalorimeter LINSEIS DSC PT 1600 der Firma Linseis Messgeräte GmbH verwendet. Das schematische Messprinzip ist in Abbildung dargestellt. Bei der Messung werden zwei Tiegel mit einer konstanten Aufheizrate erwärmt, wobei die zu messende Probe nur in einem Tiegel liegt. Die Temperatur der Probe wird kontinuierlich mit der Temperatur des leeren Tiegels verglichen. Auf die transportierte Energie kann geschlossen werden, da beide Tiegel symmetrisch auf einer Platte mit definierter Wärmeleitfähigkeit stehen. Die Anzahl der verwendeten Proben und die Messtemperaturen sind die gleichen wie in Kapitel 3.9.2 zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit. Die Aufheizrate zu den Messtemperaturen betrug 20 K in einer dynamischen Heliumatmosphäre von 12 L h⁻¹.

3.9.4 Messung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten

Das vertikale Dilatometer L75V-PT der Firma LINSEIS Messgeräte GmbH wurde für die Messung des thermischen Ausdehnungskoeffizientens verwendet. Die Messungen wurden an zylindrischen Proben mit einem Durchmesser von 4 mm und einer Länge von 10 mm durchgeführt. Die Messungen erfolgten an drei Proben pro Werkstoff und Karbidausrichtung. Als Referenz wurde eine Probe mit denselben Maßen aus Al₂O₃ verwendet, sodass durch die bekannte Ausdehnung des Referenzkörpers die Einflüsse durch das Messgestänge kompensiert werden. Die Messungen fanden im Hochvakuum bei 2×10^{-5} mbar mit einer Aufheizrate von 4 K/min bis 300 °C statt. Ab 300 °C wurde die Aufheizrate auf 15 K/min bis zu der maximalen Messtemperatur von 500 °C erhöht.

Mit Hilfe der gemessenen thermischen Ausdehnung Δl in Bezug zu der Ausgangslänge l_0 und die Temperaturänderung ΔT kann mit Gleichung 3.5 der mittlere thermische Ausdehnungskoeffizient α_{th} berechnet werden.

$$\alpha_{th} = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T} \quad (3.5)$$

3.10 Messung des spezifischen elektrischen Widerstandes und des Seebeck-Koeffizienten

Für die Messung des spezifischen elektrischen Widerstandes und des Seebeck-Koeffizienten wurde das Messgerät LSR-3 der Firma LINSEIS Messgeräte GmbH, das nach dem Vierleiterprinzip misst, verwendet. Die Messungen wurden an zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 4 mm und einer Länge von 10 mm durchgeführt. Die Messungen erfolgten an drei Proben pro Werkstoff und Karbidausrichtung. Alle Messungen erfolgten nach dreimaliger Evakuierung bis 8×10^{-2} mbar unter statischer Heliumatmosphäre bei 0,3 mbar. Gemessen wurde von RT bis 300 °C in 20 °C Schritten. Ab einer Temperatur von 300 °C wurden bis 500 °C die Messpunkte in 50 °C-Schritten erhöht. Bei jeder Messtemperatur wurden drei Messungen durchgeführt. Für die Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten wurde der Temperaturgradient von 50 °C bezogen auf die gesamte Probenlänge eingestellt.

3.11 Erstellung von Anlassdiagrammen

Für die Erstellung von Härte-Anlassdiagrammen wurden die Proben einzeln im Umluftofen-Kammerofen KU 15/06/A der Firma Thermconcept angelassen und anschließend an der Luft abgekühlt. Die Anlasstemperaturen lagen zwischen 200 °C und 500 °C. Die Temperaturschrittweiten sind Tabelle 5 zu entnehmen. Jede Probe wurde für insgesamt dreimal 70 min angelassen. Die Härtemessung erfolgte nach Kapitel 3.7.2.

3.12 Gewichtsmessungen

Um die Gewichte der verwendeten Proben, Halbzeuge und Werkzeuge zu bestimmen, wurden mehrere Waagen verwendet. Insgesamt standen drei verschiedene Waagen der Firma KERN + SOHN GmbH für einen Bereich zwischen min. 10 mg und max. 15 kg zur Verfügung. Für Gewichte unter 200 g wurde die Analysenwaage ABJ 220-5NM verwendet. Diese weist einen Bereich zwischen 10 mg und 220 g mit einer Genauigkeit von 0,1 mg auf. Bei Gewichten zwischen 220 mg und 1000 g wurde die Präzisionswaage des Typs ABJ PCB1000-2 verwendet. Die Genauigkeit beträgt ebenfalls 0,1 mg. Bei Gewichten, die über 1000 g lagen, wurde die Tischwaage FCE 15K5N verwendet. Diese kann Gewichte bis max. 15 kg bei einer Genauigkeit von 5 g ermitteln.

3.13 Computer-Aided Design

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf das CAD-System Autodesk Inventor Professional 2022 zurückgegriffen. In der CAD-Software sind alle verwendeten Werkzeuge digital erstellt worden. Mithilfe der digitalen Kopien der Werkzeuge konnten verschiedene geometrische Informationen entnommen werden. Des Weiteren wurden Schnittmuster und FEM-Berechnungen mit Autodesk Inventor erstellt und durchgeführt. Das Erstellen der Schnittmuster und die durchgeführte FEM-Berechnung werden im Folgenden beschrieben.

3.13.1 Nesting

Beim Nesting handelt es sich um das Platzieren von Geometrien in einem vorgegeben Bereich. Da die derzeit zur Verfügung stehenden Nesting-Programme als Lösungsansätze für eine Linearwirtschaft ausgelegt sind, wurden die in dieser Arbeit verwendeten Schnittmuster manuell erstellt. Als Ausgangspunkt für eine Baugruppe diente ein verschlissenes Maschinenkreismesser mit einem Durchmesser von 500 mm. Auf diesem Maschinenkreismesser sind die Halbzeuge der auszuschneidenden Repurpose-Werkzeuge platziert und angeordnet worden. Bedingt durch die benötigte Materialstärke der Drechselmeißel können diese lediglich im Flanschbereich platziert werden. Die Hakenklingen der Pappreißmesser können hingegen auch im wategeschliffenen Bereich des Maschinenkreismessers angeordnet werden. Nachdem die Halbzeuge in der Baugruppe auf der zur Verfügung stehenden Fläche angeordnet wurden, sind diese aus dem Maschinenkreismesser heraus extrudiert. Eine erstellte Zeichnungsableitung im DXF-Format diente für die in Kapitel 3.3 beschriebene Proben- und Halbzeugentnahme. Für die Berechnung der Masse und der Volumen der einzelnen Schnittmuster sind auf die berechneten Werte im CAD-System Autodesk Inventor Professional 2022 zurückgegriffen worden. Hierfür sind die iProperties der einzelnen Bauteile betrachtet und unter der Schaltfläche physikalisch entnommen worden. Als Material wurde Stahl mit einer Dichte von 7850 g cm^{-3} ausgewählt.

3.13.2 Finite Elemente Berechnung

Für eine FEM-Berechnung wurde die im CAD-System Autodesk Inventor Professional 2022 integrierte Belastungsanalyse verwendet. Ziel der Berechnung war, lediglich die Position der maximal auftretenden Spannung während des Wasserstrahlabrasivschneidens zu ermitteln. Die Berechnung erfolgte wie die Durchführung des Nestings (Kap. 3.13.1) an einem verschlissenen Maschinenkreismesser mit einem Durchmesser von 500 mm. Die für die Berechnung notwendigen Materialdaten des X153CrMoV12 (1.2379) wurden dem Materialdatenblatt des Stahls aus dem CES Selector entnommen [229]. Beim Wasserstrahlschneiden ist der Flanschbereich des Maschinenkreismessers fest eingespannt worden.

Diese Abhängigkeit ist bei der Belastungsanalyse ebenfalls getroffen worden. Die Kraft von 360 N hat vom Mittelpunkt der Zentralbohrung 200 mm in x-Richtung angegriffen. Bei der Vernetzung wurden die Standartwerte mit einer durchschnittlichen Elementgröße von 0,05 gewählt.

3.14 Analyse der Umweltleistung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde keine vollumfängliche Nachhaltigkeitsbewertung durchgeführt. Für eine Bewertung der Umweltleistung wurde auf die in der Datenbank CES Selector hinterlegten Energiewerte für Produktionsprozesse und Materialien zurückgegriffen, um eine qualitative Bewertung durchzuführen. Die für die Analyse der Umweltleistung verwendeten Werte sind der Tabelle 7 zu entnehmen. Eingeteilt wurde die Analyse der Umweltleistung in vier Bereiche. Betrachtet wurde das Nesting (Kap. 4.3), das Laserschneiden (Kap. 4.5.2) die Fertigung der konventionellen und Repurpose-Werkzeuge (Kap. 4.2 und 4.6) sowie die Standzeit der verwendeten Werkzeuge (Kap. 4.7).

Für die Analyse der Umweltleistung des Nestings wurden die beiden erstellten Schnittmuster miteinander verglichen. Hierbei wurde das verwendete Repurpose-Material (Rohlinge für Repurpose-Werkzeuge - ReM), der verbliebene Verschnitt (Material für das Recycling - RM) und das abzuschleifende Material (Gewichtsdifferenz Repurpose-Rohling zu fertigem konventionellem Werkzeug - SM_{Nesting}) berücksichtigt. Ziel der Analyse ist die Minimierung der aufzubringenden Energie nach Formel 3.6. Die gewichtsmäßigen Anteile aus den Tabellen 13 und 14 wurden mit der benötigten Energie für das Recycling (RE), dem Energiemix des Materials zur Herstellung (EM) und der benötigten Energie für das Schleifen (ES) verrechnet.

$$\text{Energie} = (RM \cdot RE) - (ReM \cdot EM) + (SM_{\text{Nesting}} \cdot ES) + (SM_{\text{Nesting}} \cdot EM) \quad (3.6)$$

Ähnlich wie beim Nesting wurde die Umweltauswirkung des optimierten Laserschneidprozessen analysiert. Es wurde definiert, dass die entstandene Wärmeeinflusszone im nachfolgenden Fertigungsprozess durch Schleifen entfernt wird. Das Ziel der theoretisch optimierten Laserschneidparameter war, dass die eingesetzte Energie des Laserschneidprozesses und des nachfolgenden Schleifens minimiert wird. Über das Volumen der entstandenen Wärmeeinflusszonen wurde auf das zu schleifende Materialgewicht (SM_{Laser}) geschlossen. Dieses wurde anschließend mit der benötigten Energie für das Schleifen (ES) über Formel 3.7 verrechnet.

$$\text{Energie} = SM_{\text{Laser o. Fertigung}} \cdot ES \quad (3.7)$$

Für eine Analyse der Umweltleistung der veränderten Produktionsprozesse wurden lediglich die Ab-

weichungen der konventionellen und repurpose Produktionsprozesse (Kap. 4.2 und 4.6) berücksichtigt. Hierbei wird aufgezeigt welche Produktionsschritte durch die Repurpose-Strategie entfallen. Des Weiteren wird ebenfalls über die zu schleifenden Materialmengen ($SM_{\text{Fertigung}}$) der Unterschied des Energieaufwandes während des Schleifprozesses nach Formel 3.7 berechnet. Die Berücksichtigung der Standzeit erfolgt aus den Ergebnissen der Verschleißversuche. Hierzu werden die Standzeiten mit dem benötigtem Energiemix für die Herstellung des Materials der einzelnen Werkzeuge verglichen.

4 Ergebnisse

4.1 Verwendete Werkstoffe

4.1.1 75Cr1 (1.2003)

Alle Werkstoffe wurden auf die chemische Zusammensetzung, die vorliegenden Gefügebestandteile und die mechanischen Eigenschaften untersucht. In Tabelle 8 sind die mittels Funkenspektrometrie ermittelten chemischen Zusammensetzungen des Stahls 75Cr1 (1.2003) aufgelistet. Alle Gehalte der einzelnen Legierungsbestandteile liegen innerhalb der in der Norm angegebenen Grenzwerte [230]. Die jeweiligen Mittelwerte der Legierungselemente wurden für die Berechnung eines Phasenmengenschaubildes mit ThermoCalc herangezogen. Alle auftretenden Phasen zwischen 400 °C und 1600 °C sind in Abbildung 21a gezeigt. Der Werkstoff wird zum Härten bei 830 °C aus dem Austenitgebiet in Öl abgeschreckt. Die gemessene Härte des Stahls 75Cr1 (1.2003) beträgt im Anlieferungszustand $(41,3 \pm 0,4)$ HRC bzw. (402 ± 12) HV5, was einer Anlasstemperatur von ca. 450 °C entspricht. Laut dem Phasenmengenschaubild in Abbildung 21a liegen im thermodynamischen Gleichgewicht bei diesen Temperaturen Ferrit und M_7C_3 -Ausscheidungen vor. Da beim Herstellungsprozess und der Wärmebehandlung kein thermodynamisches Gleichgewicht existiert, ist eine Phasenanalyse mittels XRD durchgeführt worden. Das Diffraktogramm ist in Abbildung 21b ausgewertet dargestellt. Neben der angelassenen martensitischen Matrix konnten keine M_7C_3 Karbide nachgewiesen werden. In den Abbildungen 21c bis 21f ist in lichtmikroskopischen Aufnahmen ebenfalls nur die martensitische Matrix zu sehen. Bei der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme mit 5000-facher Vergrößerung sind in Abbildung 21f die Lanzetten des angelassenen Martensits deutlich zu identifizieren.

4.1.2 80CrV2 (1.2235)

In Tabelle 9 ist die chemische Zusammensetzung nach DIN EN 10132:2022-04 [231] und die durch Funkenspektrometrie gemessenen Mittelwerte der Legierungselemente aufgelistet. Diese wurden ebenfalls zur Berechnung eines Phasenmengenschaubildes mit ThermoCalc herangezogen (Abb. 22a). Bei der durchgeführten Austenitisierungstemperatur von 850 °C wird durch ThermoCalc die Phase Austenit mit einem nicht signifikanten Anteil an MC Karbiden vorhergesagt. Da die Berechnungen unter

400 °C in ThermoCalc keine validen Ergebnisse liefern, kann keine Vorhersage für ein Gefüge nach dem Anlassen bei einer Anlasstemperatur von 200 °C getroffen werden. Im Gleichgewicht werden durch ThermoCalc bei der niedrigsten berechneten Temperatur von 400 °C die Phasen Ferrit mit Fe_3C und MC-Karbiden vorhergesagt. Ähnlich wie beim Stahl 75Cr1 (1.2003) zuvor konnte durch die Phasenanalyse mittels XRD nur eine martensitische Matrix nachgewiesen werden (Abb. 22b). Auch in den lichtmikroskopischen Aufnahmen in den Abbildungen 22c bis 22f ist lediglich die angelassene martensitische Matrix zu sehen. Die durch den Anlassprozess eingestellte Härte beträgt $(60,5 \pm 0,7)$ HRC bzw. (711 ± 8) HV5. Die nach Norm (vgl. Kap. 3.7.1) bestimmte Schlagarbeit des 80CrV2 (1.2235) beträgt (35 ± 2) J.

4.1.3 HS6-5-2C (1.3343)

Die chemische Zusammensetzung nach DIN EN ISO 4957:2018-11 ist in Tabelle 10 dargestellt [49]. Neben den vorgegebenen Anteilen der Legierungselemente sind die gemessenen Werte der einzelnen Elemente in der Tabelle 10 angegeben. Diese liegen innerhalb der in der Norm angegebenen Grenzwerte. Bei der gewählten Austenitisierungstemperatur von 1210 °C sind neben der Phase Austenit noch MC und M_6C Karbide im Gleichgewichtszustand stabil (Abb. 23a). Laut der Berechnung von ThermoCalc sind bei der Anlasstemperatur von 530 °C die Phasen Ferrit mit den Ausscheidungen MC, M_6C und M_{23}C_6 im thermodynamischen Gleichgewicht stabil. Mittels einer Phasenanalyse konnten die vorhergesagten Phasen identifiziert werden. Das gemessene Diffraktogramm ist in Abbildung 23b dargestellt. In den lichtmikroskopischen Aufnahmen in Abbildung 23c und 23d sind die enthaltenen Ausscheidungen deutlich zu sehen. Durch die schmelzmetallurgische Herstellungsrouten weist die Anordnung der Karbide eine gewisse Zeiligkeit auf. Deutlicher zu identifizieren sind die Ausscheidungen in den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in den Abbildungen 23d und 23f. Der laut ThermoCalc vorhergesagte Volumenanteil an Ausscheidungen beträgt 18 Vol.-%. Die bildanalytische Bestimmung des Karbidgehaltes nach Kapitel 3.5.5 hat einen Wert von $(11,4 \pm 0,5)$ Vol.-% in der Draufsicht ergeben. Im Querschnitt des HS6-5-2C (1.3343) liegt der Wert bei $(10,8 \pm 1,2)$ Vol.-%. Hierbei handelt es sich genau genommen um den gemessenen flächenmäßigen Anteil, also um einen zweidimensional ermittelten Wert. Durch die sphärische Form der Karbide kann über den zweidimensionalen Wert auf den dreidimensionalen Wert in Vol.-% geschlossen werden. Die durch die Wärmebehandlung eingestellte Härte des Werkstoffs beträgt $(65,5 \pm 0,2)$ HRC bzw. (853 ± 5) HV5 und die gemessene Schlagarbeit liegt bei (18 ± 2) J.

4.1.4 X153CrMoV12 (1.2379)

In Tabelle 11 ist die mittels Funkenspektrometrie ermittelte chemischen Zusammensetzung des X153CrMoV12 (1.2379) aufgelistet. Die Gehalte der einzelnen Legierungsbestandteile liegen innerhalb der in der Norm angegebenen Grenzwerte [232]. Die jeweiligen Mittelwerte der Legierungselemente sind für die Berechnung eines Phasenmengenschaubildes mit ThermoCalc herangezogen worden. Die zwischen 400 °C und 1600 °C auftretenden Phasen sind in Abbildung 24a gezeigt. Der Werkstoff wird zum Härten bei 1020 °C aus dem Zweiphasengebiet Austenit und M_7C_3 zwischen einer Quette abgeschreckt. Bei der Phasenanalyse mittels XRD konnten den Reflexen die Phasen Martensit, M_7C_3 und $M_{23}C_6$ zugeordnet werden (Abb. 24b). Auf der lichtmikroskopischen Aufnahme mit 50-facher Vergrößerung in Abbildung 24c ist die Zeiligkeit der eutektischen M_7C_3 Karbide bedingt durch die Hauptwalzrichtung während des Herstellungsprozesses zu erkennen. In den Abbildungen 24d bis 24f sind die Karbide bei höheren Vergrößerungen deutlicher zu sehen. Bei den Ausscheidungen handelt es sich um Cr-reiche M_7C_3 Karbide. Laut der Vorhersage durch ThermoCalc liegt bei der gewählten Anlasstemperatur (vgl. Kap. 4.2.1) von 520 °C ein Karbidgehalt von 23 Vol.-% vor. Die bildanalytische Bestimmung des Karbidgehaltes hat in der Draufsicht einen Wert von $(11,7 \pm 0,9)$ Vol.-% ergeben. Des Weiteren wurde der Karbidgehalt im Querschnitt für die nach Kapitel 3.3 getrennten Karbidausrichtungen parallel und senkrecht bestimmt. Bei der parallelen Karbidausrichtung lag der Karbidanteil bei $(10,5 \pm 0,5)$ Vol.-% und bei der Ausrichtung senkrecht bei $(11,2 \pm 0,3)$ Vol.-%. Hier wird ebenfalls ein zweidimensional ermittelter Wert ins Dreidimensionale übertragen. Die gemessene Härte des X153CrMoV12 (1.2379) liegt bei $(62,1 \pm 0,2)$ HRC bzw. (749 ± 9) HV5. Die Schlagproben wurden ebenfalls parallel und senkrecht zur Karbidzeiligkeit entnommen und geprüft. Der Werkstoff X153CrMoV12 (1.2379) weist mit einer Probenausrichtung parallel zu der vorliegenden Karbidzeiligkeit eine Schlagarbeit von (12 ± 1) J auf. Bei den Schlagproben senkrecht zur Karbidzeiligkeit liegt der Wert mit (9 ± 1) J darunter.

4.2 Verwendete konventionelle Werkzeuge

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Werkzeuge erläutert. Verschlissene Maschinenkreismesser aus der Hygienepapierindustrie dienten als Sekundärmaterial in dem zu entwickelnden Circular Economy Konzept. Aus diesen verschlissenen Maschinenkreismessern wurden Rohlinge für handgeführte Werkzeuge entnommen und in die bestehenden Fertigungsrouten integriert. Bei den handgeführten Werkzeugen handelt es sich um Drechselwerkzeuge für die Holzbearbeitung und Pappreißmesser zum Schneiden von Bitumenbahnen.

4.2.1 Maschinenkreismesser

Als Sekundärmaterial in dem zu entwickelnden Circular Economy Konzept standen Maschinenkreismesser aus dem in Kapitel 4.1.4 beschriebenen Kaltarbeitsstahl X153CrMoV12 (1.2379) zur Verfügung. Die Durchmesser der unbenutzten scharfen Kreismesser liegen zwischen 600 mm und 1000 mm bei einem Gewicht von 6 kg bis 10 kg. Die genauen Abmaße sind Tabelle 12 zu entnehmen. Während des Einsatzes in der Hygienepapierindustrie verringert sich der Durchmesser der einzelnen Maschinenkreismesser durchschnittlich um 100 mm. Dies ist bedingt durch das kontinuierliche Nachschleifen und die abrasive Wirkung des zu schneidenden Papiers. Die geringe Standzeit im niedrigen dreistelligen Stundenbereich ist auf den zunehmenden Schneidenwinkel zurückzuführen, da der Schneidprozess in diesem Fall unwirtschaftlich wird. Nach dem Einsatz werden die Maschinenkreismesser bisher im Mischschrott entsorgt. Da es sich um hochlegierten Kaltarbeitsstahl handelt (Kap. 4.1.4), soll dieser durch eine zirkuläre Wertschöpfung zu Repurpose-Produkten verarbeitet werden. Hierfür wurden die verschlissenen Maschinenkreismesser am Ende des Lebenszyklus gesammelt und weiterverarbeitet (Kap. 4.5 und 4.6). Da es sich um Sekundärmaterial handelt, unterschieden sich die Durchmesser der verschlissenen Maschinenkreismesser um mehrere Millimeter. Des Weiteren weisen die verschlissenen Maschinenkreismesser eine unterschiedliche Anzahl und Positionen von Spannungswalzringen auf. Diese werden bei der Fertigung der Maschinenkreismesser kreisförmig eingebracht. In Abbildung 25 ist ein wategeschliffenes Kreismesser dargestellt.

4.2.2 Drechselwerkzeug

Aus den zuvor beschriebenen Maschinenkreismessern sollen Rohlinge für Drechselwerkzeuge in der Holzbearbeitung herausgenommen werden. Als Referenzprodukte dienten Drechselmeißel mit der Bezeichnung „A20 DIN 5144“ nach DIN 5144 in zwei verschiedenen Ausführungen [233]. Zum einen wurde ein Standarddrechselmeißel aus dem Werkstoff 80CrV2 (1.2235) und zum anderen ein Hochleistungsdrechselmeißel aus dem Werkstoff HS6-5-2C (1.3343) verwendet. Laut der DIN 5144 gibt das A in der Bezeichnung an, dass es sich um einen Flachmeißel handelt. Bei der darauffolgenden Nummer handelt es sich um die Breite $b_1 = 20$ mm. Im Folgenden werden die konventionellen Herstellungsrouten des Standard- und Hochleistungsdrechselmeißels beschrieben.

Standarddrechselmeißel

Der Standarddrechselmeißel wird aus dem in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Werkstoff 80CrV2 (1.2235) hergestellt. Als Halbzeug dienen Blechtafeln, aus denen die Rohlinge der Drechselmeißel durch Laserschneiden herausgeschnitten werden. Im nächsten Schritt wird die Wärmebehandlung der Rohlinge durchgeführt, sodass die gewünschten Werkstoffeigenschaften eingestellt werden. Das Austenitisieren

erfolgt für 8 Minuten bei 850 °C in einem Salzbad. Das anschließende Abschrecken wird in einem Ölbad bis zu einer Temperatur von ca. 60 °C durchgeführt. In einem Salzbad erfolgt das Anlassen für 70 Minuten bei 200 °C. Zwischen beiden Vorgängen und nach dem Anlassen werden die Rohlinge bei 95 °C für 5 Minuten in einer Mischung aus Wasser und Öltrenner abgekocht. Das resultierende Gefüge und die Werkstoffeigenschaften sind Kapitel 4.1.2 zu entnehmen.

Möglicher Verzug in den wärmebehandelten Rohlingen wird in einen manuellen Richtprozess korrigiert. Nachdem die Rohlinge wärmebehandelt und gerichtet sind, werden diese auf einer CNC-Schleifmaschine bearbeitet. Hierbei werden alle Seiten des Drechselmeißels plan- und abschließend die Schneide angeschliffen. Während des Schleifprozesses reduziert sich das Gewicht des Drechselmeißels von (203 ± 1) g um 22 Ma.-% auf (158 ± 1) g. Abschließend durchlaufen die Drechselmeißel noch eine Qualitätskontrolle und eine Lackierung mit Klarlack als Korrosionsschutz. Die letzten Arbeitsschritte sind das Anbringen des Holzschafes und das Verpacken.

Hochleistungsdrechselmeißel

Die Fertigungsroute der Hochleistungsdrechselmeißel aus dem in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Schnellarbeitsstahl unterscheidet sich von der Fertigungsroute der Standarddrechselmeißel. Die Rohlinge werden ebenfalls durch Laserschneiden aus einer Blechtafel herausgetrennt und anschließend wärmebehandelt. Das Härten erfolgt in einem Schutzgasofen, in dem die Rohlinge für 15 min bei 1210 °C austenitiert und anschließend abgeschreckt werden. Anschließend erfolgt ein dreimaliges Anlassen für jeweils 120 min bei 530 °C. Kapitel 4.1.3 sind die durch die Wärmebehandlung eingestellten Materialeigenschaften zu entnehmen. Die Hochleistungsdrechselmeißel werden händisch an Bandschleifmaschinen geschliffen. Dabei erfolgt der Materialabtrag ebenfalls an allen Flächen und durch das Anschleifen der Schneide. Hierbei verringert sich das Ausgangsgewicht von (173 ± 2) g um 13 Ma.-% auf (151 ± 5) g. Nachdem manuellen Schleifprozess durchlaufen die Hochleistungsdrechselmeißel dieselben Fertigungsschritte wie der Standarddrechselmeißel.

4.2.3 Pappreißmesser

Die Hakenklinge des Pappreißmesser wird aus dem in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Werkstoff 75Cr1 (1.2003) hergestellt. Ähnlich wie bei den Drechselmeißeln werden die Rohlinge der Hakenklinge durch das Laserschneiden aus einer Blechtafel herausgetrennt. Aus einem Blech werden insgesamt 152 Rohlinge mit einem Gesamtgewicht von 4,45 kg entnommen. Der nicht verwendete Verschnitt des Bleches beträgt 3,89 kg. Die Rohlinge durchlaufen während der Fertigung keine Wärmebehandlung, sodass diese direkt dem Schleifprozess zugeführt werden. Dieser findet wie bei den Hochleistungsdrechselmeißeln händisch an einer Bandschleifmaschine statt. Das Ausgangsgewicht des Rohlings beträgt 49 g.

Nach dem Schleifen liegt das Gewicht der Rohlinge bei $(47,1 \pm 0,5)$ g, was einer Reduzierung von 3,9 Ma.-% entspricht. Anschließend wird an der Hakenklinge ein Holzgriff montiert und das verkaufsfertige Pappreißmesser verpackt.

4.3 Nesting

Für die Fertigung von Repurpose-Werkzeugen müssen Halbzeuge aus Sekundärmaterial ausgeschnitten werden. Das Erstellen der Schnittmuster für das Ausschneiden der Halbzeuge ist ein wichtiger Faktor bei der ökologischen und ökonomischen Bewertung einer zirkulären Wertschöpfung. In Abbildung 26 sind zwei verschiedene Schnittmuster zu sehen, die digital nach Kapitel 3.13.1 erstellt wurden. Das Maschinenkreismesser hat einen Durchmesser von 530 mm, was dem Durchmesser eines verschlissenen 611er Maschinenkreismessers entspricht. Aus dem Flanschbereich des verschlissenen Kreismessers sind vier Drechselmeißel entnommen worden. Die Pappreißmesser sind hierzu im 90° Winkel angeordnet, sodass die Karbidzeiligkeit bei beiden Repurpose-Werkzeugen identisch an der Schneide verläuft. Lediglich in Abbildung 26a ist ein Pappreißmesser leicht angewinkelt, sodass bei beiden Schnittmustern 22 Pappreißmesser entnommen werden können. Bei diesem Schnittmuster handelt es sich um einen möglichen Ausgangszustand des durchgeführten Nestings, in Abbildung 26b hingegen um ein für die zirkuläre Wertschöpfung optimiertes Schnittmuster.

In den Tabellen 14 und 13 sind die Daten der beiden Schnittmuster aufgelistet. Das Ausgangsvolumen des verschlissenen Maschinenkreismesser beträgt $688\,026\text{ mm}^3$, was einem Gewicht von 5401 g entspricht. Nachdem die Halbzeuge aus dem Maschinenkreismesser entnommen wurden, beträgt das Gewicht des Verschnitts aus Abbildung 13a 2750 g ($350\,392\text{ mm}^3$). Ausgehend von dem Gewicht und dem Volumen des verschlissenen Kreismessers berechnet sich das Gewicht der Halbzeuge von 2651 g ($350\,392\text{ mm}^3$). Das Gesamtgewicht der fertigen Repurpose-Werkzeuge beträgt 1724 g bei einem Volumen von $223\,167\text{ mm}^3$. Die abzutragende Differenz zwischen dem Gesamtgewicht der Halbzeuge und den fertigen Repurpose-Werkzeugen beträgt 927 g ($114\,468\text{ mm}^3$). In Abbildung 14 ist ein optimiertes Schnittmuster dargestellt. Die Anzahl der herauszuschneidenden Repurpose-Werkzeuge ist gleich geblieben, lediglich die Position der Hakenklingen ist verändert worden. Die Daten dieses Schnittmusters sind Tabelle 14 zu entnehmen. Das Gewicht des Verschnitts erhöht sich auf 2954 g ($376\,247\text{ mm}^3$). Resultierend ergibt sich damit ein Gewicht von 2447 g ($311\,780\text{ mm}^3$) für die Halbzeuge der Repurpose-Werkzeuge. Durch das verringerte Volumen der Halbzeuge muss lediglich $88\,613\text{ mm}^3$ (723 g) Material bei der anschließenden Fertigung der Repurpose-Werkzeuge abgetragen werden. Das entspricht einer Reduzierung um 22 Ma.-% Materialabtrag.

4.4 Vor-Ort Metallographie

Wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, wurde an den zur Verfügung stehenden Maschinenkreismessern Methoden der ambulanten Metallographie als qualitätssichernde Maßnahme in einer zirkulären Wertschöpfung hochlegierter Stähle erarbeitet. Die lichtmikroskopischen Aufnahmen mit 200-facher Vergrößerung der jeweiligen Oberflächenzustände sind in den Abbildungen 27 bis 31 dargestellt. In jeder Abbildung sind vier lichtmikroskopische Aufnahmen des Acetatfolienabdrucks eines jeweiligen Vorbehandlungszustandes der Versuchsoberflächen nach Tabelle 1 dargestellt.

Die Abdrücke der unbehandelten Oberflächen sind in Abbildung 27 dargestellt. In den Abbildungen 27a, b und d sind deutliche Riefen von der Maschinenkreismesseroberfläche zu sehen. Bei der unbehandelten Oberfläche, die für sieben Minuten mit V2A-Beize geätzt wurde, sind in Abbildung 27c neben Riefen auch leichte Abdrücke von Karbiden zu identifizieren. Bei der mit P500 Mesh (SiC-Partikelgröße 30 µm) geschliffenen Oberfläche ist ein ähnliches Ergebnis zu sehen. In den Abbildungen 28a, b und d sind erneut nur Riefen im Abdruck zu erkennen. Im Gegensatz zu der unbehandelten Oberfläche sind die Konturen der Karbide in der Acetatfolie bei der für 7 min mit V2A-Beize geätzten Oberfläche detailreicher zu erkennen (Abb. 28c).

In Abbildung 29 sind die Abdrücke der mit P1500 Mesh SiC-Schleifpapier (10 µm) geschliffenen Oberflächen zu sehen. Nach zweiminütigen Ätzen mit V2A-Beize sind neben Riefen leicht wahrnehmbare Umrisse von Karbiden zu sehen (Abb. 29a). Die Ätzung mit HNO₃ für 2 min hinterlässt keine erkennbaren Abdrücke von Riefen oder Karbiden auf der Acetatfolie (Abb. 29b). Werden die mit P1500 Mesh geschliffenen Oberflächen für 7 min mit V2A-Beize oder HNO₃ geätzt, sind Abdrücke der Karbide in der Acetatfolie detailliert zu erkennen.

Bei den polierten Versuchsoberflächen mittels 6 µm Diamantensuspension können in Abbildung 30 in allen Abdrücken Karbide identifiziert werden. In den Abdrücken der 3 min geätzten Oberflächen sind die Karbide weiterhin nur schemenhaft zu erkennen (Abb. 30a und b). Gegenüber der mit P1500 Mesh geschliffenen Oberflächen weisen die Abdrücke der bis auf 6 µm polierten Oberfläche keine signifikante Verbesserung des Karbidabdrucks auf (Abb. 30c und d). In Abbildung 31 sind die lichtmikroskopischen Aufnahmen der Abdrücke der bis auf 1 µm polierten Oberflächen dargestellt. In den Abbildungen 31a, c und d sind die Karbide deutlich zu erkennen. Im Abdruck der für 3 min mittels HNO₃ geätzten Oberfläche sind die Karbide weiterhin nur schematisch zu erkennen (Abb. 31b).

4.5 Halbzeugherstellung

Für die Herstellung der Halbzeuge wurden aus den zur Verfügung stehenden Maschinenkreismessern Halbzeuge durch Wasserstrahlabrasiv- und Laserschneiden entnommen (Kap. 3.3). In Abbildung 32

sind exemplarisch zwei verschiedene Maschinenkreismesser dargestellt, aus denen Rohlinge und Proben mittels Wasserstrahlschneiden herausgetrennt wurden. Zu sehen ist, dass die einzelnen Rohlinge und Proben entlang und parallel zur Karbidzeiligkeit entnommen sind. Diese ist durch das in Kapitel 3.4.2 beschriebene ambulante Verfahren identifiziert worden. In Abbildung 32a ist darüber hinauszusehen, dass die Proben und Rohlinge kleine Stege aufweisen. Diese dienen dazu, dass die Rohlinge im Schneidprozess nicht herausfallen und die entsprechende Ausrichtung anschließend markiert werden kann. Bei diesem Maschinenkreismesser handelt es sich um eine Ronde, die nach dem Planschleifen aus der Fertigungsroute entnommen worden ist. Diese weist eine durchgängige Materialstärke von 5 mm auf. Bei dem Maschinenkreismesser in Abbildung 32b handelt es sich um ein verschlissenes Exemplar, das die in Kapitel 4.2.1 beschriebene Kontur aufweist. Zu sehen ist die präparierte Stelle, um die Karbidausrichtung festzustellen. Im Übergang des Flanschbereiches sind ebenfalls die kreisförmig eingebrachten Walzlinien zu sehen, die während des Spannungswalzens entstehen. Entlang dieser Walzlinie ist ein Riss, auf den im folgenden Kapitel 4.5.1 eingegangen wird, zu sehen.

4.5.1 Wasserstrahlschneiden

Die Aufnahme einer Schnittkante eines wasserstrahlgeschnittenen Rohlings ist in Abbildung 33 dargestellt. In der stereomikroskopischen Aufnahme bei einer 10-fachen Vergrößerung (Abb. 33a) ist zu sehen, dass die Schnittkante Korrosionsspuren aufweist. An der oberen Kante, der Eintrittsseite des Wasserstrahls, ist eine Kantenverrundung zu identifizieren. Die Strahlaustrittsseite hingegen weist einen scharfkantigen Übergang auf. An der Seite des Strahlaustrittes sind die Riefen des Wasserabrasivstrahles zu sehen. Das Erscheinungsbild dieser Riefen lässt Rückschlüsse auf die Schnittqualität zu. Bei einer 3000-fachen Vergrößerung im REM sind deutliche Riefen an der Oberfläche der Schnittfläche zu sehen (Abb. 33b). Diese entstehen durch das Auftreffen der im Wasserstrahl beigemischten Abrasivpartikel.

In Abbildung 34 ist der zuvor erwähnte Riss mit höheren Vergrößerungen dargestellt. Zu sehen ist, dass der Riss an einem herausgeschnittenen Rohling startet und sich kreisförmig entlang der Walzringe ausbreitet. Durch das kreisförmige Ausbreiten des Risses können über die gesamte Wate der Maschinenkreismesser keine weiteren Rohlinge für Handwerkzeuge herausgeschnitten werden. Lediglich im Flanschbereich des Maschinenkreismessers können weitere Rohlinge für Repurpose-Produkte mittels Wasserstrahlschneiden entnommen werden.

FEM-Berechnung

Das Ergebnis der in Kapitel 3.13.2 beschriebenen FEM-Berechnung ist in Abbildung 35 dargestellt. Mithilfe dieser Berechnung soll lediglich eine Aussage über die Position der maximal auftretenden

Spannung während des Wasserstrahlschneidens getätigt werden. In den blauen Bereichen liegt nahezu keine Spannung vor. Ausgehend von dem Punkt der einleitenden Kraft ist zu sehen, dass die Spannung sichelförmig in Richtung des Flanschbereiches wirkt. Am Übergang zum Flanschbereich ist die maximale Spannung durch den roten Bereich gekennzeichnet.

4.5.2 Laserschneiden

In Abbildung 36a ist die Schnittfläche eines lasergeschnittenen Halbzeugs in zehnfacher Vergrößerung dargestellt. An der Lasereintrittsseite ist eine Abrundung der Schnittkante zu sehen. Kurz unterhalb dieser abgerundeten Kante ist darüber hinaus ein Bereich zu sehen, in dem das aufgeschmolzene Material im Übergang zur Schnittfläche erstarrt ist. Dieser Bereich grenzt sich durch eine dunkle optische Linie ab. Auf der Unterseite, der Laserstrahlaustrittsseite, ist keine Kantenverrundung zu sehen. In der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme der Schnittfläche ist bei einer 3000-fachen Vergrößerung zu sehen (Abb. 36b), dass sich kleinere Rissnetzwerke und Poren auf der Schnittfläche gebildet haben.

Wärmeeinflusszone Laserschneiden

Der Einfluss der in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Parameterstudie auf die Breite der Wärmeeinflusszone während des Laserschneidens ist im Querschnitt und in der Draufsicht der entnommenen Proben analysiert worden. In Abbildung 37 ist die herausgeschnittene Probe mit einer Laserleistung für 6 mm exemplarisch dargestellt.

Breite der Wärmeeinflusszone

In den Abbildungen 38 bis 42 sind die lichtmikroskopischen Aufnahmen der Randzone der Fläche B (Abb. 37) bedingt durch die verschiedenen Fertigungsparameter nach Tabelle 2 dargestellt. In den Abbildungen ist jeweils die Randzone mit 100-facher Vergrößerung durch die entsprechende Laserleistung bei den unterschiedlichen Materialstärken dargestellt. Zusätzlich ist ein Diagramm in den Abbildungen zu sehen, in dem die mittels ImageJ gemessene Breite der wärmebeeinflussten Zone über die Materialstärke aufgetragen ist.

Abbildung 38 zeigt die entstandene Wärmeeinflusszone bei einer Materialstärke von 2 mm mit entsprechender Laserleistung. Mit einer gemessenen Breite von 79 μm ist die Wärmeeinflusszone, die sich als heller Streifen im kontrastierten Gefüge ausbildet, zu erkennen. Wird bei der Materialstärke von 2 mm eine Laserleistung für 4 mm Materialstärke verwendet, bildet sich mit 103 μm eine um 30 % breitere Wärmeeinflusszone aus (Abb. 39a). In Abbildung 39 ist zu sehen, dass sich mit zunehmender

Materialstärke die Wärmeeinflusszone auf $91\text{ }\mu\text{m}$ reduziert. Deutlich zu erkennen ist, dass die Wärmeeinflusszone sich in zwei Bereiche aufteilt. Zum einen ein deutlich hellerer Streifen der am äußersten Rand zu identifizieren und besonders gut in Abbildung 39a zu sehen ist. Zum anderen ein aufgehellten breiteren Streifen, der zwischen dem Randstreifen und dem unbeeinflussten Grundgefüge liegt.

Die Wärmeeinflusszonen für die Laserleistungen 6 mm, 8 mm und 10 mm sind in den Abbildungen 40 bis 42 dargestellt. Zu sehen ist, dass die Wärmeeinflusszone bei gleichen Materialstärken mit steigender Laserleistung breiter wird. Des Weiteren ist ebenfalls aus den Diagrammen zu entnehmen, dass die Breite der Wärmeeinflusszone mit steigender Materialstärke verringert wird. In Abbildung 43 sind alle gemessenen Breiten der Wärmeeinflusszonen bei entsprechender Laserleistung und Materialstärke in einem Diagramm zusammengefasst. Bei einer Materialstärke von 2 mm ist zu sehen, dass die Breite der Wärmeeinflusszone von $79\text{ }\mu\text{m}$ auf $171\text{ }\mu\text{m}$ um 116 % ansteigt. Die geringste Breite der Wärmeeinflusszone liegt vor, wenn die Laserleistung der Materialstärke entspricht.

Härteverlauf durch die Wärmeeinflusszone

Durch die in den Abbildungen 38 bis 42 dargestellten Wärmeeinflusszonen wurden Härteverlauf aufgenommen. Verwendet wurde das in Kapitel 3.7.2 beschriebene Verfahren nach Vickers. Hierzu wurden drei parallele Messreihen mit jeweils 6 Messpunkten durchgeführt. Die einzelnen Messpunkte hatten zum Rand und untereinander einen Abstand von $40\text{ }\mu\text{m}$. In Abbildung 44 ist der Härteverlauf der Materialstärke von 2 mm und einer Laserleistung von 10 mm exemplarisch dargestellt. Zu sehen ist eine Aufhärtung in der Randzone gegenüber der Kernhärte. Bei einem Randabstand von $40\text{ }\mu\text{m}$ liegt die gemessene Härte bei $961\text{ HV}_{0,05}$ mit $183\text{ HV}_{0,05}$ über der Kernhärte von $778\text{ HV}_{0,05}$. Mit steigendem Randabstand nimmt die gemessene Aufhärtung ab. Die Kernhärte wird ab der optisch bestimmten WEZ erreicht. Diese lag bei einer Materialstärke von 2 mm und der verwendeten Laserleistung für 10 mm Materialstärke bei $171\text{ }\mu\text{m}$. In den ermittelten Härteverläufen konnte kein Bereich nachgewiesen werden, in dem die gemessene Härte deutlich unterhalb der Kernhärte lag. Alle gemessenen Härteverläufe wiesen den gleichen Verlauf auf. Die höchste Aufhärtung lag bei einem Randabstand von $40\text{ }\mu\text{m}$ vor, die bis zur optisch bestimmten Breite der WEZ auf die Kernhärte abnahm.

Mikroskopische Wärmeeinflusszonenanalyse

Die Randzone der Wärmeeinflusszone ist in Abbildung 45 mit 1000-facher und 3000-facher Vergrößerung dargestellt. Bei 1000-facher Vergrößerung in Abbildung 45a ist zu sehen, dass sich das Gefüge an der Schnittkante verändert hat. Die im Grundgefüge vorhandenen M_7C_3 Karbide sind am Rand nicht mehr zu identifizieren. Stattdessen hat sich eine feine netzartige Struktur ausgebildet. Neben dieser Struktur ist zu sehen, dass sich bereits kleinere Risse am Rand gebildet haben. Bei der 3000-fachen

Vergrößerung ist die netzartige Struktur in Abbildung 45b deutlicher zu sehen. Während des Laserschneidens ist die Randzone aufgeschmolzen und erneut erstarrt. Durch die hohe Abkühlgeschwindigkeit hat sich ein feines Karbidnetz ausgebildet. Die Größe der Metallzellen liegt zwischen $1\text{ }\mu\text{m}$ und $5\text{ }\mu\text{m}$. Angrenzend an diese Struktur ist zu sehen, dass sich die M_7C_3 Karbide teilweise aufgelöst haben. Die zum Rand ausgerichteten Seiten mancher Karbide weisen einen im Schneidprozess teilweise aufgeschmolzenen Bereich auf.

4.6 Fertigung der Repurpose Werkzeuge

Nachdem die Rohlinge aus den zur Verfügung stehenden Maschinenkreismessern herausgetrennt wurden (Kap. 4.5), sind diese in die konventionellen Fertigungsrouten integriert worden. Die Repurpose-Rohlinge haben nicht die kompletten Fertigungsrouten der konventionellen Werkzeuge aus Kapitel 4.2 durchlaufen, sondern wurden an geeigneten Fertigungsschritten in die Produktion integriert.

4.6.1 Repurpose-Drechselmeißel

Die Repurpose-Rohlinge für die Drechselmeißel A20 DIN 5144 nach DIN 5144 wurden direkt in den maschinellen Schleifprozess der Fertigungsroute integriert [233]. Es erfolgte keine erneute Wärmebehandlung, da die bereits eingestellten Materialeigenschaften des X153CrMoV12 (1.2379) (Kap. 4.1.4) vergleichbar mit denen des Hochleistungsdrechselmeißels sind. Durch die Entnahme der Rohlinge im planparallel geschliffenen Flanschbereich der Maschinenkreismesser konnte darüber hinaus das Richten entfallen. Der Materialabtrag während des Schleifens lag bei $(4,4 \pm 0,1)\text{ g}$. Das Rohlinggewicht von $(135,1 \pm 0,4)\text{ g}$ verringerte sich durch das Schleifen somit auf $(130,7 \pm 0,2)\text{ g}$, was einer Reduzierung von 3 Ma.-% entspricht. Da die Seitenflächen des Drechselbeitels bereits in einem geschliffenen Zustand vorlagen, sind lediglich die Schnittkanten und die Schneide angeschliffen worden. Anschließend haben die Repurpose-Drechselmeißel ebenfalls die Qualitätskontrolle durchlaufen. Abschließend wurden das Holzheft montiert und der fertige Repurpose-Drechselmeißel verpackt.

4.6.2 Repurpose-Pappreißmesser

Die Repurpose-Rohlinge für die Hakenklinge des Pappreißmessers sind aus dem äußeren Watebereich des Maschinenkreismessers entnommen worden (Kap. 4.5) und weisen somit die typische Abnahme der Klingenbreite zur Klingenspitze auf. Die gesamte Fertigungsroute der Repurpose-Pappreißmesser unterscheidet sich bei den einzelnen Fertigungsschritten nicht von der konventionellen Fertigung (Kap. 4.2.3). Die Rohlinge werden ebenfalls händisch an Bandschleifmaschinen geschliffen und im Anschluss erfolgte die Montage des Holzgriffes. Das Gewicht des Rohlings verringerte sich durch das Schleifen

von $(97,2 \pm 0,4)$ g um 2 Ma.-% auf $(95,6 \pm 0,8)$ g.

4.7 Tribologische Untersuchungen

Ein Materialwechsel ist durch das Verwenden der Maschinenkreismesser als Sekundärmaterial für die Fertigung von Repurpose-Werkzeugen gegenüber den konventionellen Werkzeugen bedingt. Um diesen Einfluss des Materialwechsels auf die Verschleißbeständigkeit der Repurpose-Werkzeuge im Gegensatz zu den konventionellen Werkzeugen zu analysieren, sind im Folgenden die Ergebnisse der tribologischen Untersuchungen (Kap. 3.8) dargestellt. Neben den Einzelritzversuchen an den in dieser Arbeit verwendeten Werkstoffen (Kap. 4.1) sind anwendungsnahe Verschleißversuche mit den konventionellen und Repurpose-Werkzeugen (Kap. 4.2) durchgeführt worden.

4.7.1 Ritzversuch

Die aufgezeigten Kennwerte und Mikrostrukturuntersuchungen nach den durchgeführten Ritzversuchen (Kap. 3.8.1) der in dieser Arbeit verwendeten Werkstoffe geben Aufschluss über das Verhalten eines Werkstoffs während des tangentialen Eindringens eines Prüfkörpers in der Materialoberfläche. Diese Beanspruchung mit steigender Ritzkraft entspricht der Furchung einer Werkstoffoberfläche durch verschieden große Abrasivpartikel und bildet im realen Anwendungsfall den Ausgangspunkt eines abrasiven Verschleißprozesses ab. Als mechanische Ritzkennwerte werden die aufgezeichneten Tangentialkräfte und deren Mittelwerte aufgezeigt. Zu den geometrischen Ritzkennwerten zählen die Ritzbreiten, die Ritztiefen und die f_{ab} -Werte.

Mechanische Ritzkennwerte

Die aufgezeichneten mechanischen Ritzkennwerte sind in den Abbildungen 46 bis 50 dargestellt. Aufgetragen ist die nach Formel 3.2 berechnete Tangentialkraft F_T über die Ritzlänge von 1000 μm . Hierbei wird zwischen den Ritzrichtungen 0° , 45° und 90° unterschieden. Für jeden Werkstoff und jede Ritzrichtung sind die Tangentialkräfte der durchgeführten Ritze in den Abbildungen 46 bis 48 aufgetragen. Abbildung 49 stellt die Mittelwerte der Tangentialkraft der unterschiedlichen Ritzrichtung pro Werkstoff gegenüber. Für einen werkstoffübergreifenden Vergleich sind die Mittelwerte der Tangentialkräfte jedes Werkstoffs in Abbildung 50 pro Ritzrichtung zusammengefasst.

In Abbildung 46 sind die Tangentialkräfte der in 0° durchgeführten Ritzversuche dargestellt. Die obersten beide Diagramme zeigen die Tangentialkräfte der niedriglegierten Kaltarbeitsstähle 75Cr1 (1.2003) und 80CrV2 (1.2235). Das mittlere Diagramm stellt die Tangentialkraft des Schnellarbeitsstahl HS6-5-2C (1.3343) dar. Die Tangentialkräfte des Kaltarbeitsstahls X153CrMoV12 (1.2379) sind

in den unteren beiden Diagrammen abgebildet, links in der Karbidausrichtung längs und rechts in der Ausrichtung quer. Zu sehen ist, dass ab einer Ritzlänge von 400 μm und einer Ritzkraft von 400 mN die Tangentialkraft der niedriglegierten Kaltarbeitsstähle signifikant ansteigt. Beim Stahl 75Cr1 (1.2003) verlaufen die drei Kurven der Tangentialkraft ähnlich. Diese steigt bis zur maximalen Ritzkraft von 1000 mN nach 1000 μm Ritzlänge auf ungefähr 900 mN an. Ungleichmäßiger verlaufen hingegen die Tangentialkräfte des 80CrV2 (1.2235). Hier hat der erste Ritz, bezeichnet mit 0 Grad 1, den gleichmäßigsten Verlauf. Beim zweiten liegt zwischen 500 μm und 800 μm ein Plateau vor. Nach 800 μm steigt die Tangentialkraft signifikant bis auf 900 mN an. Die Tangentialkraft des dritten Ritzes steigt erst ab einer Ritzlänge von 500 μm an und nimmt nach 800 μm wieder ab. Die Tangentialkraft nach 1000 μm Ritzlänge liegt bei ca. 500 mN. Den gleichmäßigsten Verlauf der Tangentialkräfte weist der Stahl HS6-5-2C (1.3343) auf. Hier steigt die Tangentialkraft ab einer Ritzlänge von 600 μm deutlicher an. Ab 700 μm sind kleinere Ausschläge in den Kraftverläufen zu sehen. Die maximale Tangentialkraft beträgt 620 mN bei 1000 μm . Beim X153CrMoV12 (1.2379) steigen die Tangentialkräfte zwischen 500 μm und 600 μm steiler an. Bereits ab 300 μm können hingegen schon kleinere Ausschläge identifiziert werden, die ab einer Ritzlänge von 700 μm zunehmen. Die maximalen Tangentialkräfte liegen in der Karbidausrichtung längs und quer unter 600 mN.

Die Ritzversuche in der 45° Ausrichtung wurden lediglich beim Stahl HS6-5-2C (1.3343) und dem Stahl X153CrMoV12 (1.2379) in der Karbidausrichtung längs und quer durchgeführt, da diese Werkstoffe Karbidzeiligkeiten aufweisen (Kap. 4.1). Die berechneten Tangentialkräfte sind in Abbildung 47 dargestellt. Zu sehen ist ein ähnlicher Verlauf gegenüber der zuvor beschriebenen 0°-Ausrichtung. Die Tangentialkraft des HS6-5-2C (1.3343) hat einen gleichmäßigeren Verlauf gegenüber dem Stahl X153CrMoV12 (1.2379). Beim Stahl X153CrMoV12 (1.2379) unterscheiden sich die Verläufe in der Karbidausrichtung längs und quer in der Ritzrichtung 45° im Gegensatz zu der Richtung 0°. Die Karbidausrichtung längs weist mehr und intensivere Ausschläge in den Verläufen der Tangentialkraft auf. Abbildung 48 stellt die Tangentialkraftverläufe der Ritzrichtung 90° dar. In dieser Ausrichtung wurden bei allen verwendeten Werkstoffen Ritzversuche durchgeführt. Beim Stahl 75Cr1 (1.2203) ist zu sehen, dass die Tangentialkräfte wie bei der 0°-Ausrichtung ab einer Ritzlänge von 300 μm signifikant ansteigen. Der weitere Verlauf der Tangentialkräfte weist hingegen deutlich mehr Ausschläge auf. Die Tangentialkraft des ersten (90 Grad 1) und zweiten (90 Grad 2) Ritzes weist nach 1000 μm einen Wert zwischen 600 mN und 700 mN auf. Die Tangentialkraft des dritten (90 Grad 3) Ritzes hingegen einen Wert von 900 mN, das demselben Wert wie bei der 0°-Ausrichtung entspricht. Die Verläufe des Stahls 80CrV2 (1.2235) sind in der 90°-Ritzrichtung nahezu identisch zur 0°-Richtung. Die Tangentialkräfte steigen ab 400 μm an und weisen über die verbliebene Ritzlänge signifikante Ausschläge auf. Nach einer Ritzlänge von 1000 μm liegen die drei berechneten Tangentialkräfte ebenfalls in einer großen Range zwischen 600 mN und 900 mN. Der Stahl HS6-5-2C (1.3343) weist keinerlei Unterschiede zwi-

schen der 0° -, 45° - und 90° -Ritzrichtung auf. Der Kaltarbeitsstahl X153CrMoV12 (1.2379) zeigt in der 90° Grad Ritzrichtung erneut leichte Unterschiede zwischen der Karbidausrichtung längs und quer. Bei der Querausrichtung sind die Kraftausschläge nicht so ausgeprägt und die Tangentialkräfte nach 900 mN liegen näher zusammen.

Aus den drei durchgeführten Ritzen pro Werkstoff und Ausrichtung wurden die Mittelwerte der Tangentialkräfte gebildet. Diese sind pro Werkstoff mit den entsprechenden Ritzrichtungen in Abbildung 49 dargestellt. Beim 75Cr1 (1.2203) steigt die gemittelte Tangentialkraft in beiden Ritzrichtungen bei ungefähr 400 μm an. Beide Verläufe weisen Parallelen auf, der keine klare Tendenz aufzeigt. Lediglich nach 1000 μm am Ritzende liegt die gemittelte Tangentialkraft der 90° -Ritzrichtung ca. 200 mN unter der 0° -Richtung. Die gemittelten Tangentialkräfte der beiden Ritzrichtungen des 80CrV2 (1.2235) zeigen das gegenteilige Verhalten. Hier steigen die Ritzkräfte nach unterschiedlichen Ritzlängen an. Ab einer Ritzlänge von 700 μm ist der Verlauf nahezu identisch. Der Schnellarbeitsstahl HS6-5-2C (1.3343) zeigt ähnliche Verläufe bei den gemittelten Tangentialkräften. Zu sehen ist, dass die Ausrichtung 45° über die gesamte Ritzlänge die geringste Kraft aufweist. Die Ritzrichtung 0° weist hingegen nahezu durchgängig die höchste Tangentialkraft auf. Eine derartige Tendenz lässt sich beim X153CrMoV12 (1.2379) nicht identifizieren. Die Verläufe werden in der Quer- und Längsausrichtung von den Kraftausschlägen überlagert. Ähnlich wie bei den einzeln betrachteten Verläufen in den Abbildungen 46 bis 48 zeigt sich, dass die Tangentialkraft in der Karbidausrichtung quer geringere Kraftausschläge aufweist als in der Karbidausrichtung längs.

Um die einzelnen Werkstoffe miteinander vergleichen zu können, sind die gemittelten Tangentialkräfte in Abbildung 50 pro Ritzrichtung zusammengefasst. Deutlich zu sehen ist, dass die niedriglegierten Kaltarbeitsstähle gegenüber dem Schnellarbeitsstahl und hochlegierten Kaltarbeitsstahl höhere Tangentialkräfte aufweisen. Der 75Cr1 (1.2003) weist den höchsten Verlauf auf. Im Bereich der Ritzlänge von 520 μm bis 820 μm sind die Verläufe der beiden niedriglegierten Kaltarbeitsstähle auf einem ähnlichen Niveau. Danach steigt die Tangentialkraft des 75Cr1 (1.2003) gegenüber dem 80CrV2 (1.2235) erneut signifikant an. Beim Vergleich des HS6-5-2C (1.3343) mit dem X153CrMoV12 (1.2379) ist zu sehen, dass ab einer Ritzlänge von 700 μm der X153CrMoV12 (1.2379) mit der Karbidausrichtung längs die geringsten Tangentialkräfte aufweist. In der Ritzrichtung 45° weisen die Verläufe der gemittelten Tangentialkraft einen ähnlichen Verlauf auf. Lediglich zwischen 600 μm und 700 μm liegt die Tangentialkraft des HS6-5-2C (1.3343) unterhalb des X153CrMoV12 (1.2379) mit beiden Karbidorientierungen. Bei den Versuchen mit einer Ritzrichtung 90° ist zu sehen, dass die Tangentialkraft des 75Cr1 (1.2003) erneut als erstes ansteigt. Im Gegensatz zu der 0° -Ausrichtung überschreitet die gemittelte Tangentialkraft des 80CrV2 (1.2235) die des 75Cr1 (1.2003) zwischen der Ritzlänge von 500 μm bis 730 μm . Anschließend steigt die Tangentialkraft des 75Cr1 (1.2003) erneut über die des 80CrV2 (1.2235). Nach 1000 μm liegen die gemittelten Tangentialkräfte der niedriglegierten Kaltarbeitsstähle

wieder auf einem ähnlichen Niveau. Bei dem hochlegiertem Kaltarbeitsstahl X153CrMoV12 (1.2379) mit der Karbidausrichtung quer ist zu sehen, dass die gemittelte Tangentialkraft bis zu einer Ritzlänge von 750 µm kontinuierlich über der Karbidausrichtung längs und dem Schnellarbeitsstahl HS6-5-2C (1.3343) liegt. Ab der Ritzlänge von 750 µm liegen die Tangentialkräfte des X153CrMoV12 (1.2379) unterhalb der des Schnellarbeitsstahls.

Konfokale Laserrastermikroskopische Aufnahmen

Die dreidimensional erfassten Verschleißspuren (Kap. 3.5.4) sind in der Reihenfolge 75Cr1 (1.2003), 80CrV2 (1.2235), HS6-5-2C (1.3343), X153CrMoV12 (1.2379) Karbidausrichtung längs und anschließend quer in den Abbildungen 51 bis 63 dargestellt. Die Ritzspuren sind mit derselben Bezeichnung wie in Kapitel 4.7.1 gekennzeichnet. Am unteren Bildrand ist ein Maßbalken eingefügt, sodass eine definierte Ritzlänge mit der entsprechenden Ritzkraft an den jeweiligen Positionen der Ritzspuren zugeordnet werden kann.

Die Ritzspuren des 75Cr1 (1.2003) in der Ritzrichtung 0° sind in Abbildung 51 und die Richtung 90° in Abbildung 52 dargestellt. In beiden Richtungen ist zu sehen, dass ab einer Ritzlänge von 300 µm Materialaufwurf entlang der Ritzspur auftritt. Bei allen drei Ritzspuren in Ausrichtung 0° ist ab 800 µm Ritzlänge der Materialaufwurf deutlich zu sehen (Abb. 51). Im Gegensatz dazu ist bei der 90°-Ausrichtung am Ende der ersten beiden Ritzspuren ein Span zu sehen und der Materialaufwurf entlang der Ritzspuren ist deutlich geringer (Abb. 52). Die Abbildungen 53 und 54 zeigen die Ritzspuren des 80CrV2 (1.2235) in der 0° und 90°-Ritzrichtung. Der Materialaufwurf tritt hier ab einer Ritzlänge von 400 µm auf, wobei dieser bei der Ritzrichtung in 90° signifikant höher ist.

Die Aufnahmen der Ritzspuren des HS6-5-2C (1.3343) sind in den Abbildungen 55 bis 57 dargestellt. Gut zu erkennen ist die Ausrichtung der Ritzspuren zu der Karbidzeiligkeit. Bei der Ritzrichtung 0° verläuft die Ritzspur parallel zur Karbidzeiligkeit (Abb. 55). In Abbildung 56 ist zu sehen, dass die Karbidzeiligkeit im 45°-Winkel zu den Ritzspuren verläuft und bei der Ausrichtung 90° senkrecht dazu. In allen Ausrichtungen ist ab einer Ritzlänge von 600 µm zu sehen, dass sich entlang der Ritzspur leichter Aufwurf bildet. Verläuft die Ritzspur entlang ein größeres Karbids, wird diese an der entsprechenden Stelle verengt. Dieser Vorgang ist an der Ritzspur 90 Grad 1 in Abbildung 57 markiert.

In den Abbildungen 58 bis 60 sind die Ritzspuren des X153CrMoV12 (1.2379) mit der Karbidausrichtung längs dargestellt. Die Abbildungen 61 bis 63 zeigen die Karbidausrichtung quer des X153CrMoV12 (1.2379). Neben den Ritzspuren bildet sich leichter Aufwurf bereits nach 500 µm. Dieser nimmt mit zunehmender Ritzlänge zu. Gegenüber dem HS6-5-2C (1.3343) weisen alle Ritzspuren des X153CrMoV12 (1.2379) mehr Engstellen auf.

Geometrische Ritzkennwerte

Anhand der dreidimensional erfassten Verschleißspuren aus Kapitel 4.7.1 wurden geometrische Ritzkennwerte ermittelt. Diese sind in den Tabellen 15 bis 19 für jeden Werkstoff aufgelistet. Zu den geometrischen Ritzkennwerten zählen die Ritztiefe, die Ritzbreite und der F_{ab} -Wert. Für die vereinfachte Darstellung wurden die Werte in den Abbildungen 67 bis 72 visualisiert dargestellt und pro Ritzrichtung zusammengefasst. Im Folgenden wird zuerst auf die Ritztiefe, dann auf die Ritzbreite und anschließend auf die ermittelten F_{ab} -Werte eingegangen.

Bei der Ritztiefe ist zu sehen, dass der 75Cr1 (1.2203) mit $6,19\mu\text{m}$ den höchsten Wert nach einer Ritzlänge von $1000\mu\text{m}$ in der 0° -Richtung aufweist. Zwischen $500\mu\text{m}$ und $700\mu\text{m}$ Ritzlänge verzeichnet die Ritztiefe in beiden Ritzrichtungen keine signifikante Änderung (Tab. 15). Bei den Ritztiefen des 80CrV2 (1.2235) ist auffällig, dass die gemessenen Werte ab $700\mu\text{m}$ erhöhte Standardabweichungen beinhalten. Beim Vergleichen der Ritztiefen des HS6-5-2C (1.3343) (Tab. 17) mit denen des X153CrMoV12 (1.2379) (Tab. 18 und 19) ist zu sehen, dass die Werte des Schnellarbeitsstahl bis zu einer Ritzlänge von $700\mu\text{m}$ niedriger sind. Zwischen $700\mu\text{m}$ und $1000\mu\text{m}$ liegen die Ritztiefen des X153CrMoV12 (1.2379) in beiden Karbidausrichtungen unter denen des HS6-5-2C (1.3343). Die geringste Ritztiefe weist der X153CrMoV12 (1.2379) mit der Karbidausrichtung längs nach $1000\mu\text{m}$ in Ritzrichtung 0° auf (Tab. 18).

In den Abbildungen 67 bis 69 sind die Daten der Ritzbreiten visualisiert dargestellt. Die Verläufe sind ähnlich zu denen der Ritztiefe, da die Ritztiefe mit der Ritzbreite korreliert. An der Position der maximalen Ritztiefe weist die Ritzspur des 75Cr1 (1.2003) eine Ritzbreite von $23,10\mu\text{m}$ auf. Mit einer maximalen Ritzbreite von $19,59\mu\text{m}$ des 80CrV2 (1.2235) liegt diese $3,51\mu\text{m}$ unterhalb des 75Cr1 (1.2003). Die breiteste Stelle des 80CrV2 (1.2235) tritt nach $800\mu\text{m}$ in der Ausrichtung 0° auf. Die geringste Ritzbreite weist der X153CrMoV12 (1.2379) mit der Karbidausrichtung längs auf. Hier liegt die Ritzbreite nach $1000\mu\text{m}$ in der 90° bei $13,85\mu\text{m}$. Das entspricht einer Differenz von $9,25\mu\text{m}$ zu der maximal gemessenen Ritzbreite des 75Cr1 (1.2203).

Die F_{ab} -Werte wurden wie in Kapitel 3.8.1 beschrieben ermittelt. Aus den Werten in den Tabellen 15 bis 19 wurden die F_{ab} -Werte grafisch in den Abbildungen 70 bis 72 dargestellt. Auffällig ist, dass bei allen Werkstoffen und Ritzrichtungen hohe Standardabweichungen auftreten. Der F_{ab} -Wert gibt an, ob vorwiegend Mikropflügen oder Mikrospanen vorliegt (Kap. 2.6.2). Bei einem Wert von 0 liegt ideales Mikropflügen vor und bei einem Wert von 1 ideales Mikrospanen. Bei Werten zwischen 0 und 1 tritt eine Kombination aus beiden Verschleißmechanismen auf. In den Abbildungen 70 bis 72 ist zu sehen, dass bei allen Werkstoffen und Ritzrichtungen die F_{ab} -Werte nahezu alle über 0,5 liegen, sodass hauptsächlich Mikrospanen vorliegt. Lediglich beim 80CrV2 (1.2235) in Ritzrichtung 90° tendieren die F_{ab} -Werte in der ersten Ritzhälfte zum Mikropflügen (Abb. 72). Die F_{ab} -Werte über die

Ritzlänge beim HS6-5-2C (1.3343) zeigen in den drei Ritzrichtungen unterschiedliche Verläufe. Während bei der 0°-Ritzrichtung der F_{ab} -Werte über die Ritzlänge deutlicher Richtung Mikrospanen, also einem Wert von 1 ansteigen liegen die Werte in der 90°-Ritzrichtung über die gesamte Länge im Bereich des Mikrospanens. Bei der 45°-Richtung sinkt der F_{ab} -Wert bis zu einer Ritzlänge von 600 μm auf 0,47 und steigt anschließend wieder kontinuierlich bis auf einen Wert von 0,95 an. Die Verläufe des X153CrMoV12 (1.2379) weisen in beiden Karbidausrichtungen und den Ritzrichtungen 0° und 90° ähnliche Verläufe auf. Bis zu einer Ritzlänge von 700 μm weisen die Verläufe starke Schwankungen auf. Anschließend tendieren die Werte Richtung Mikrospanen. In der 45°-Ausrichtung steigen die F_{ab} -Werte über die Ritzlänge in Richtung Mikrospanen an.

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen

In den Abbildungen 73 bis 77 sind exemplarisch rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Einzelritzspuren zu sehen. Die Aufnahmen zeigen die Ritzpositionen bei 200 μm , 400 μm , 600 μm , 800 μm und 1000 μm . Aufgenommen wurden die jeweiligen Positionen an einem Einzelritz bei der 90°-Ausrichtung aller verwendeten Werkstoffen. Die Aufnahmen der Position nach 200 μm Ritzlänge erfolgte mit 10 000-facher Vergrößerung. Nach 1000 μm am Ende der Ritzspur erfolgte die Aufnahme mit 2000-facher Vergrößerung. Alle anderen Positionen entlang des Einzelritztes sind mit 5000-facher Vergrößerung dargestellt.

Die Ritzspur des 75Cr1 (1.2003) weist in den Abbildungen 73a und 73b eine glatte Oberfläche innerhalb der Furche auf. Entlang der Furche ist ein leichter Materialaufwurf zu sehen. In Abbildung 73c sind innerhalb der Furche kleine Ausbrüche sichtbar, deren Anzahl bis zur Position in Abbildung 73e zunimmt. Entlang der Ritzspur sind an den Positionen nach 600 μm und 800 μm neben Materialaufwurf auch abgerissene Bereiche zu identifizieren. Der höchste Materialaufwurf bildet sich entlang der Ritzspur bei 1000 μm am Ende der Furche (Abb. 73e). Die Furche des 80CrV2 (1.2235) weist in den Abbildungen 74a bis 74e ähnliche Verschleißspuren auf. Lediglich die kleineren Ausbrüche innerhalb der Furche sind erst am Ende der Ritzspur sichtbar (Abb. 74e). Des Weiteren ist das abgerissene Material entlang der Furche in Abbildung 74c signifikant höher als bei dem Werkstoff 75Cr1 (1.2003). Die im HS6-5-2C (1.3343) enthaltenen Hartphasen (Kap. 4.1.3) sind in den Abbildungen 75a bis 75e entlang der Ritzspur zu sehen. Gegenüber der zuvor betrachteten Werkstoffe weist die Ritzspur des HS6-5-2C (1.3343) innerhalb der Furche keine kleineren Ausbrüche auf. In den Abbildungen 75a bis 75c ist entlang der Furche leichter Materialaufwurf zu erkennen. Die in der Matrix eingebetteten Hartphasen weisen keinen signifikanten Einfluss auf die Furchenbreite auf. An den Positionen nach 800 μm und 1000 μm ist entlang der Furche zu sehen (Abb. 75d und e), dass Material abgerissen ist. Am Ende des Einzelritztes ist in Abbildung 75e zusätzlich Materialaufwurf zu sehen. Dieser hat sich als teilweise

abgerissener Span ausgebildet.

Abbildungen 76 und 77 zeigen die Positionen des X153CrMoV12 (1.2379). Die Positionen der Einzelritze an den Proben der parallelen Karbidzeiligkeit sind in Abbildung 76 dargestellt. Die Proben senkrecht zur Karbidausrichtung hingegen in Abbildung 77. Die Oberfläche der Furchen weisen keine kleinen Ausbrüche auf, jedoch in Abbildung 76d ist ein kleiner Riss zu sehen. Entlang der Furche weisen die beiden Einzelritze keine Stellen auf, an denen Material abgerissen ist. Lediglich an Stellen, bei denen die Furche eine Hartphase trifft, ist der Materialaufwurf signifikant reduziert. Darüber hinaus bewirken die enthaltenen Hartphasen eine Reduzierung der Furchenbreite, wie es in Abbildung 76d zu sehen ist. Da sich der Materialaufwurf zu stark aufgeladen hat, wurde in den Abbildungen 77c und 77d BSE-Aufnahmen verwendet.

4.7.2 Drechselversuche

Makroskopische Probenanalyse

Die Drechselmeißelspitze des Standard-Drechselmeißels aus dem Werkstoff 80CrV2 (1.2235) weist nach den in Kapitel 3.8.2 Drechselversuchen verschiedene Anlassfarben an der Spitze auf (Abb. 78). Ausgehend von der Spitze ist auf der rechten Seite des Drechselbeitels ein halbkreisförmiger Verlauf der Anlassfarben über die Schneide hinwegzusehen (Abb. 78a). Auf der linken Seite des Drechselbeitels ist ein ähnlicher Verlauf an der vorderen Schneide zu sehen (Abb. 78b). Darüber hinaus gibt es zusätzliche Anlassfarben am Übergang der Schneide zu der seitlichen Drechselbeitelfläche. Die Seitenfläche weist neben der ursprünglichen matten Oberfläche einen zusätzlichen glänzenden Halbkreis auf.

Der High-Performance-Drechselmeißel aus HS6-5-2C (1.3343) weist nach den Drechselversuchen keine signifikanten Anlassfarben auf (Abb. 79). Auf der rechten Seite der Drechselbeitelspitze sind nur leichte Verfärbungen direkt unterhalb der angreifenden Schneide an der Spitze zu sehen (Abb. 79a), wohingegen die linke Seite der Drechselmeißelspitze deutlich mehr Verfärbung aufweist. (Abb. 79b). Der obere Teil der vorderen Schneide zeigt eine leichte bräunliche Einfärbung, die in Richtung der angreifenden Schneide zunimmt. Die stärkste Verfärbung liegt am Übergang der Schneide zur Seitenfläche vor. Auf der vorderen Seitenfläche sind zusätzlich halbkreisförmige Schleifspuren zu identifizieren.

Beim Repurpose-Drechselmeißel aus X153CrMoV12 längs (1.2379) sind unterhalb der angreifenden Schneide Anlassfarben zu sehen (Abb. 80a). Diese sind auf der rechten Seite des Drechselwerkzeugs ebenfalls als Halbkreis ausgebildet. Auf der linken Seite des Drechselwerkzeugs ist ein kleiner Bereich parallel zur angreifenden Schneide verfärbt (Abb. 80b). Ähnlich wie beim High-Performance-Drechselbeitel sind am Übergang von der Schneide zur Seitenfläche stärkere Verfärbungen zu sehen.

Die halbkreisförmigen Schleifspuren sind ebenfalls auf der linken Seitenfläche erkennbar. Ein identisches Erscheinungsbild ist auch bei dem Repurpose-Drehselwerkzeug aus X153CrMoV12 (1.2379) mit der Karbidzeiligkeit quer in Abbildung 81 zu sehen.

Prozesstemperaturen

Wie in Kapitel 3.8.2 beschrieben, wurden während der Drehselversuche die Prozesstemperaturen an vier verschiedenen Punkten im Bereich der Drehselmeißelspitze aufgezeichnet (Abb. 16). Die aufgezeichneten Prozesstemperaturen der jeweiligen Drehselwerkzeuge sind in den Abbildungen 82 bis 85 dargestellt. Bei allen Temperaturkurven ist zu Beginn des Versuches ein rascher Temperaturanstieg und während des gesamten Prozesses ein amplitudenförmiger Verlauf an allen Messpunkten zu sehen. Dabei liegen die Temperaturen T1, T2 und T3 im Mittel bei allen betrachteten Werkzeugen dicht beieinander. Die Werte liegen, je nach Werkzeug, zwischen 250 °C und 275 °C. Die jeweiligen Temperaturen T4 liegen hingegen etwa 25 °C bis 50 °C darunter. Die maximal gemessenen Temperaturen der einzelnen Thermoelemente sind aus Tabelle 20 zu entnehmen.

Abbildung 82 zeigt die gemessenen Prozesstemperaturen, die beim Standard-Drehselwerkzeug aus 80CrV2 (1.2235) aufgezeichnet wurden. Zu Beginn des Versuchs lag die gemessene Temperatur bei 21,4 °C, was der Raumtemperatur entspricht. Mit dem ersten Einstich stiegen die gemessenen Temperaturen an den Positionen T1 bis T3 auf über 250 °C an. Die Temperatur an der Position T4 erreichte beim ersten Einstich 175 °C. Während des gesamten Versuchs lagen die Temperaturen T1 bis T3 auf einem konstanten Temperaturniveau zwischen 275 °C und 300 °C. Zu sehen ist, dass die Temperatur an der Stelle T2 mit 301,3 °C den höchsten Wert erreichte (Tab. 20).

Die gemessenen Temperaturen bei dem High-Performance Drehselbeitel aus HS6-5-2C (1.3343) liegen insgesamt unter denen des Standard-Drehselbeitels. Die aufgezeichneten Temperaturen sind in Abbildung 83 dargestellt. Nach ca. 275 Sekunden wird ebenfalls an der Position T2 die höchste Temperatur von 287,3 °C erreicht. Bei dem Temperaturverlauf über den gesamten Versuch ist eine stetige Temperaturabnahme bis zum Versuchsende zu erkennen.

Bei den aufgezeichneten Temperaturen der Repurpose-Drehselwerkzeuge aus X153CrMoV12 (1.2379) ist ein Unterschied in der Amplitudenhöhe gegenüber den konventionellen Drehselwerkzeugen zu sehen. Die geringste Amplitudenhöhe der einzelnen Einstiche ist bei der Karbidzeiligkeit längs in Abbildung 84 zu erkennen. Die Verläufe sind ähnlich zu dem High-Performance-Drehselbeitel, da die Temperaturen über den Versuch stetig abnehmen. Bei dem Versuch des Repurpose-Drehselbeitels aus X153CrMoV12 (1.2379) mit der Karbidzeiligkeit quer ist das Thermoelement an der Position T3 nach ca. 70 Sekunden abgerissen (Abb. 85). Im Vergleich der aufgezeichneten Temperaturen der bei-

den Repurpose-Drehselwerkzeuge ist zu sehen, dass die maximalen Temperaturen an den Positionen T1 und T2 mit einer Differenz von ca. 3 °C keine signifikanten Unterschiede aufweisen (Tab. 20). Die maximal gemessene Temperatur an der Position T4 weist hingegen eine Differenz von 15,1 °C zwischen den Repurpose-Drehselwerkzeugen auf. Beim Betrachten der dargestellten Temperaturkurven (Abb. 84 und 85) ist dieser Unterschied ebenfalls deutlich zu sehen. Die Temperaturen an der Position T4 bei der Karbidzeiligkeit quer ist über die gesamte Versuchsdauer deutlich niedriger sind als bei der Karbidzeiligkeit längs.

In Abbildung 86 sind drei Amplituden des Temperaturverlaufs aus dem Versuch des Standard-Drehselwerkzeugs dargestellt. Betrachtet wird die Versuchszeit zwischen 460 Sekunden und 495 Sekunden. Zu sehen ist, dass die Temperatur an der Messstelle T1 zuerst von ca. 260 °C auf 290 °C ansteigt. Als nächstes steigen die Temperaturen T2 und T3 an, wobei die Temperatur T2 anschließend die Temperatur T1 übersteigt. Die Temperatur T4 verläuft ebenfalls amplitudenförmig, liegt jedoch um die 50 °C unterhalb der anderen aufgezeichneten Temperaturen.

Gewichtsmessungen

Die Ergebnisse der Gewichtsmessung vor und nach den Drehselversuchen sind in Tabelle 21 aufgelistet. Für den Standard-Drehselbeitel aus 80CrV2 (1.2235) und für die Repurpose-Werkzeuge aus dem Material X153CrMoV12 (1.2379) mit der Karbidausrichtung längs und quer ist jeweils ein Gewichtsverlust zu verzeichnen. Der höchste Materialverlust mit 0,07 g ist für das Repurpose-Werkzeug aus X153CrMoV12 (1.2379) und einer Karbidausrichtung quer zur Schneide zu verzeichnen. Der geringste Verlust von 0,03 g wird bei dem Repurpose-Werkzeug aus X153CrMoV12 (1.2379) längs erreicht. Für den Versuchsdurchlauf für das High-Performance-Werkzeug aus HS6-5-2C (1.3343) wird hingegen eine Zunahme von 0,01 g gemessen. Die Materialabnahme für den Standard-Drehselbeitel aus dem Werkstoff 80CrV2 (1.2235) beträgt 0,04 g.

Bildanalytische Auswertung des Flächenverlustes

Die Ergebnisse der prozentualen Flächenverluste der Werkzeugspitzen in der Drauf- und Seitenansicht sind in Tabelle 22 zusammengefasst und wie in Kapitel 3.8.2 beschrieben an den Abbildungen 87 bis 90 durchgeführt worden. Im Folgenden bezieht sich der jeweils erstgenannte Wert auf die Drauf- und der zweitgenannte Wert auf die Seitenansicht. Den höchsten prozentualen Flächenverlust an der Werkzeugspitze, sowohl in der Drauf- als auch in der Seitenansicht, weist das Standard-Drehselwerkzeug aus 80CrV2 (1.2235) auf. Mit einem Verlust von 10,98 % in der Draufsicht und 9,77 % in der Seitenansicht ist dieser gegenüber dem High-Performance-Drehselbeitel nahezu doppelt so groß. Der Flächenverlust beträgt hier 5,15 % und 5,65 %. Die geringsten Verluste an der Werkzeugspitze wurden an

den Repurpose-Drehelwerkzeugen aus X153CrMoV12 (1.2379) gemessen. Bei der Karbidausrichtung quer im Werkzeug liegt der Flächenverlust bei 2,61 % und 3,03 %. Das Repurpose-Drehelwerkzeug mit der Karbidausrichtung längs im Werkzeug weist mit 2,03 % und 1,73 % die geringsten Verluste an der verschlissenen Werkzeugspitze auf.

Mikroskopische Probenanalyse

In den Abbildungen 87 bis 90 sind die verschiedenen Drehelmeißelspitzen mit 150-facher Vergrößerung in der Drauf- und Seitenansicht dargestellt. Die Abbildung a) zeigt die Spitzen in der Draufsicht im Ausgangszustand vor den Versuchen und in Abbildung b) im verschlissenen Zustand nach den Versuchen. Die Seitenansicht der Drehelmeißelspitzen ist in denselben Zuständen in den Abbildungen c) und d) zu sehen.

Mit Blick auf die Drehelbeitelspitze des Standard-Drehelmeißels aus 80CrV2 (1.2235) ist in Abbildung 87a und 87b zu sehen, dass die Spitze im Ausgangszustand sowohl in der Drauf- als auch in der Seitenansicht geradlinige Kanten aufweist. Deutlich zu sehen sind in Abbildung 87a die Ausgangsschneiden, die bis zur Werkzeugspitze zulaufen. Die Ausgangsspitze des Standard-Drehelbeitels ist in Abbildung 87c markiert. In der Draufsicht der verschlissenen Drehelbeitelspitze aus 80CrV2 (1.2235) ist eine deutliche Kantenverrundung an den Schneiden zu erkennen (Abb. 87b). So nimmt die Werkzeugspitze in der Draufsicht eine bauchige Form an. Entlang der abgerundeten Schneide ist die Spanfläche als heller Streifen wahrnehmbar. An die Spanfläche grenzt ein dunklerer oxidierte Bereich an. Die Seitenansicht (Abb. 87d) zeigt eine starke Kantenverrundung der Werkzeugspitze, die in eine Vertikale und letztlich in den ursprünglichen Verlauf der Schneide übergeht. Die Spanfläche und die Oxidschicht sind ebenfalls in der Seitenansicht zu sehen.

Die Drehelmeißelspitze im Ausgangszustand und im verschlissenen Zustand aus HS6-5-2C (1.3343) ist in Abbildung 88 dargestellt. Im Ausgangszustand der Drauf- (Abb. 88a) und Seitenansicht (Abb. 88b) ist bereits eine Kantenverrundung an der Schneide und der Werkzeugspitze zu sehen. Ähnlich zu dem Drehelwerkzeug aus 80CrV2 (1.2235) sind im verschlissenen Zustand deutlichere Kantenverrundungen zu sehen. Des Weiteren ist die Spanfläche erneut als heller Streifen sichtbar. In der Seitenansicht ist neben der hellen Spanfläche eine ausgeprägte Oxidschicht zu erkennen.

Die Abbildungen 89 und 90 zeigen die Spitzen der Repurpose-Drehelbeitel vor und nach den durchgeführten Verschleißversuchen. Ähnlich wie die Werkzeugspitzen des High-Performance-Drehelbeitels aus HS6-5-2C (1.3343) weisen die Repurpose-Werkzeuge im Ausgangszustand bereits eine leichte Kantenverrundung auf. Im Gegensatz zum High-Performance-Drehelbeitel ist die Werkzeugspitze im Ausgangszustand nicht komplett abgerundet, sondern läuft in einem stumpfen Winkel zu (Abb. 89c). Die Drehelbeitelspitzen im verschlissenen Zustand weisen ein ähnliches

Erscheinungsbild zu den zuvor beschriebenen auf. Neben der Kantenverrundung sind die Spanfläche und eine Oxidschicht zu sehen. Bei der Karbidausrichtung quer des Repurpose-Drechselbeitels ist nach dem Verschleißversuch ein Span an der Spitze zu identifizieren (Abb. 90b und 90d).

Härteverlauf

Nach den Verschleißversuchen wurden an den Drechselwerkzeugen Härtemessungen an der Spitze durchgeführt. Hierzu wurde das Drechselwerkzeug wie nach Abbildung 93 dargestellt getrennt und eingebettet (Kap. 3.4.1). Hierzu wurde zuerst der Schnitt A durchgeführt und somit die obere Hälfte des Drechselwerkzeugs abgetrennt. Diese wurde anschließend durch Schnitt B zerteilt, wobei der Trennschnitt so versetzt wurde, dass die Trennscheibe nicht durch die Spitze trennt. An allen Drechselbeiteln wurden insgesamt drei verschiedene Prüfraster nach Kapitel 3.7.2 durchgeführt. Hierfür wurde ein absolutes Koordinatensystem auf die eigentliche Werkzeugspitze gesetzt, sodass alle Messpunkte hierzu positioniert worden sind. Die Messungen an dem High-Performance Drechselbeitel aus HS6-5-2C (1.3343) und den beiden Repurpose-Drechselwerkzeugen aus X153CrMoV12 (1.2379) weisen gegenüber der Ausgangshärte keinen Unterschied auf. Im Folgenden werden lediglich die Ergebnisse der drei Prüfraster für den Standard-Drechselbeitel aus 80CrV2 (1.2235) dargestellt.

Das Prüfraster beginnt an den Koordinaten ($X = 7,5 \text{ mm}$, $Y = 0 \text{ mm}$, $Z = 8 \text{ mm}$) und verläuft symmetrisch entlang der x-Achse. Der Abstand der einzelnen Eindrücke ist in Richtung der x- und y-Achse jeweils mit $380 \mu\text{m}$ gewählt worden. Die Messreihe ober- und unterhalb der Mittelachse beginnt nach den ersten drei Messpunkten. Insgesamt wurden in diesem Prüfraster 149 Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse des ersten Prüfrasters durch Schnitt A - A sind in Abbildung 94 dargestellt. Zu sehen ist, dass die Messwerte bei einem Abstand zur Drechselbeitelspitze von $7,5 \text{ mm}$ mit ca. 620 HV_5 die niedrigsten Werten aufweisen. Bis zu einem Abstand von ungefähr $12,5 \text{ mm}$, bei dem der Übergang der Schneide zur vollen Querschnittsdicke vorliegt, steigen die Härtewerte auf 670 HV_5 an. Zwischen $12,5 \text{ mm}$ und $15,5 \text{ mm}$ stellt sich ein Plateau ein. Anschließend steigen die gemessenen Härtewerte bis zum Abstand von 20 mm von der Drechselbeitelspitze auf die Ausgangshärte von 725 HV_5 an.

Ebenfalls in Schnitt A wurde ein Prüfraster, das um 90° zum ersten Prüfraster gedreht war, gemessen. Dieses Prüfraster beginnt an den Koordinaten $X = 12,13 \text{ mm}$, $Y = 2,09 \text{ mm}$, $Z = 8 \text{ mm}$. Der Randabstand der äußeren Messpunkte beträgt $410 \mu\text{m}$. Die Abstände zwischen den Messpunkten sind mit $380 \mu\text{m}$ dieselben wie im ersten Prüfraster. In jeder Messreihe werden zwölf Härtewerte gemessen, sodass das Prüfraster insgesamt 36 Messwerte beinhaltet. Die Ergebnisse des zweiten Prüfrasters sind in Abbildung 95 dargestellt. Deutlich zu sehen ist ein Anstieg der Härtewerte über den Querschnitt des Drechselmeißels. Nach den Verschleißversuchen liegt die Härte bei einem Randabstand von $410 \mu\text{m}$

bei ca. 625 HV5. Diese steigt zur Mitte des Drechselbeitels hin auf 650 HV5 an, sodass sich ein Plateau ausbildet. Zur anderen Seite des Drechselbeitels steigt die Härte zum Rand hin bis auf 675 HV5 weiter an. Die über den Querschnitt gemessenen Härtewerte liegen zwischen 50 HV5 und 100 HV5 unter der Ausgangshärte von 725 HV5.

Das dritte Prüfraster wurde im Schnitt B der oberen Werkzeughälfte durchgeführt. Das Prüfraster beginnt an den Koordinaten $X = 0,8 \text{ mm}$, $Y = 0 \text{ mm}$, $Z = 0,4 \text{ mm}$ in der Werkzeugspitze. Die einzelnen Messpunkte sind mit einem Abstand von $400 \mu\text{m}$ und einer Gesamtlänge von 25 mm der einzelnen Messreihen durchgeführt worden. Insgesamt sind in diesem Prüfraster 180 Messwerte erhoben worden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 96 dargestellt und weisen einen ähnlichen Verlauf zum ersten Prüfraster auf. An der Spitze des Drechselbeitels liegt bei Reihe 1 die geringste Härte von ca. 610 HV5 vor. Die Härtewerte steigen bis zu einem Randabstand von 22,5 mm auf die Kernhärte von 725 HV5 an.

4.7.3 Schneidleistungstest

Makroskopische Probenanalyse

In Abbildung 97 ist eine Hakenklinge nach dem 50-Zyklus des Schneidleistungstests dargestellt. Der im Schneidversuch angreifende Schneidenbereich ist deutlich zu sehen, da die Seitenfläche der Klinge mit Bitumen behaftet ist. Neben dem anhaftenden Bitumen sind kleinere Schiefersplitter zu sehen, die an diesem kleben.

Kraft-Weg-Diagramme

Die Ergebnisse der Schneidleistungstest sind in den Abbildungen 98 bis 100 als Kraft-Weg-Diagramm dargestellt. Aufgetragen ist die Schnittkraft in N über den zurückgelegten Weg in mm. Der erste Zyklus (schwarz) gibt die Ausgangsschärfe der Hakenklinge an. In Rot ist die gemessene Schnittkraft beim fünfzigsten Zyklus dargestellt. Zu sehen ist, dass bei den aufgetragenen Zyklen die Schnittkraft auf den ersten 25 mm schnell ansteigt und ab einem zurückgelegten Weg von 220 mm auf 0 N abfällt. Das Kraft-Weg-Diagramm für die konventionelle Hakenklinge aus 75Cr1 (1.2003) ist in Abbildung 98 dargestellt. Die Schnittkraft des ersten Zyklus liegt zwischen 150 N und 175 N auf einem konstanten Niveau. Beim fünfzigsten Zyklus steigt die Schnittkraft bis 100 mm auf 230 N an. Anschließend sinkt die Schnittkraft kontinuierlich auf 175 N ab, bis die Bitumenbahn bei 225 mm getrennt ist.

Für die Repurpose-Hakenklinge aus dem Werkstoff X153CrMoV12 (1.2379) mit einer längs orientierten Karbidausrichtung ist das zugehörige Kraft-Weg-Diagramm in Abbildung 99 dargestellt. Zu sehen ist, dass die Schnittkraft gegenüber der konventionellen Hakenklinge im ersten Zyklus deutlich höher liegt und keinen konstanten Verlauf aufweist. Die maximale Schnittkraft des ersten Zyklus liegt nach

55 mm bei 205 N. Beim fünfzigsten Zyklus liegt die maximale Schnittkraft nach 75 mm bei 215 N, was einem Anstieg von 10 N zur Ausgangsschärfe entspricht. Nach den maximalen Schnittkräften am Anfang des Versuches sinken bei beiden Zyklen die Schnittkräfte auf ca. 175 N ab, wobei die Schnittkraft des fünfzigsten Zyklus über der Ausgangskraft liegt.

Abbildung 100 zeigt das Kraft-Weg-Diagramm für den Werkstoff X153CrMoV12 (1.2379) mit einer quer orientierten Karbidausrichtung. Die Schnittkraft nach dem ersten Zyklus stellt der schwarze Graph dar und der rote Graph die Schnittkraft nach 50 Zyklen. Es fällt auf, dass keine Steigerung der maximalen Schnittkraft auftritt.

Beim Vergleich der Schnittkräfte des ersten Zyklus der verschiedenen Hakenklingen ist in Abbildung 101 zu sehen, dass die Schnittkräfte der Repurpose-Hakenklingen über denen der konventionellen Hakenklinge liegen. Gegenüber der konventionellen Hakenklinge steigen die Schnittkräfte der Repurpose-Werkzeuge stärker an und über den Schneidweg nimmt die Schnittkraft konstant ab. Bei der Betrachtung der Schnittkräfte des jeweils fünfzigsten Zyklus in Abbildung 102 weisen die Schnittkräfte der Hakenklingen einen vergleichbaren Verlauf auf. Die Schnittkräfte steigen bis ca. 100 mm an und sinken anschließend kontinuierlich bis zum Ende vom Schnitt bei 225 mm.

Schnittkräfte Ausgleichsgeraden

Für die Ermittlung der Ausgleichsgeraden der auftretenden Schnittkräfte über die durchgeführten Zyklen wurden die gemessenen Schnittkräfte zwischen 50 mm und 200 mm gemittelt. Die gemittelten Schnittkräfte jedes fünften Zyklus sind in Tabelle 23 aufgelistet.

Die Ausgleichsgerade für die konventionelle Hakenklinge aus 75Cr1 (1.2003) ist in Abbildung 103 dargestellt. Die berechnete Gerade schneidet die Ordinatenachse bei einer Schnittkraft von 150 N und weist eine Steigung von 1,02 auf. Die daraus resultierende Geradengleichung lautet:

$$F_k(x) = 1,02 \cdot x + 150 \quad (4.1)$$

In Abbildung 104 ist die Ausgleichsgerade der Repurpose-Hakenklinge aus X153CrMoV12 (1.2379) mit einer Karbidausrichtung längs zur Schneide aufgetragen. Zu erkennen ist, dass die Ausgleichsgerade die Ordinatenachse bei 177 N schneidet. Mit einer Steigung von 0,38 verläuft diese deutlich flacher im Vergleich zu der des 75Cr1 (1.2003). Die berechnete Ausgleichsgerade lautet:

$$F_k(x) = 0,38 \cdot x + 177 \quad (4.2)$$

In Abbildung 105 wird die Ausgleichsgerade der Repurpose-Hakenklinge mit der Karbidausrichtung quer zur Schneide gezeigt. Die Gerade weist mit 0,14 die geringste Steigung auf und wird mit folgender

Geradengleichung beschrieben:

$$F_k(x) = 0,14 \cdot x + 183 \quad (4.3)$$

Gewichtsmessungen

Das Gewicht der einzelnen Hakenklingen vor und nach dem Verschleißversuch ist Tabelle 24 zu entnehmen. Aus dieser geht hervor, dass bei den Werkstoffen 75Cr1 (1.2003), X153CrMoV12 (1.2379) längs und X153CrMoV12 (1.2379) quer ein Gewichtsverlust zu erkennen ist. Der größte Materialverlust von 0,04 g ist beim Werkzeug aus dem Werkstoff 75Cr1 (1.2003) gemessen worden. Bei beiden Werkzeugen aus dem Werkstoff X153CrMoV12 (1.2379) liegt der Materialverlust bei 0,01 g.

Mikroskopische Probenanalyse

Für die mikroskopische Analyse der Hakenklingen nach dem fünfzigsten Zyklus wurden diese mit Aceton gereinigt und anschließend nach Abbildung 106 getrennt und das Probenstück A metallografisch präpariert (Kap. 3.4.1). Die Analyse des präparierten Probenstücks A und der Schneide des Stücks B erfolgte unter dem Rasterelektronenmikroskop (Kap. 3.5.3). In den Abbildungen 107 bis 109 sind die Aufnahmen des Ausgangszustandes und der verschlissene Zustand der Hakenklingschneide mit 500-facher Vergrößerung dargestellt.

Die REM-Aufnahmen der Schneide der konventionellen Hakenklinge aus 75Cr1 (1.2003) sind in Abbildung 107 dargestellt. In den Abbildungen 107a und 107b ist der Querschnitt (Abb. 106 - Probe A) zu sehen. Im Ausgangszustand weist die Schneide bereits eine Kantenverrundung von 31 µm im Durchmesser auf. Nach den fünfzig Zyklen wird eine Kantenverrundung von 318 µm im Durchmesser gemessen. Das entspricht einem prozentualen Zuwachs von 1026 %. In Abbildung 107c die Hakenklingschneide (Abb. 106 - Probe B) in der Draufsicht dargestellt, bei der eine scharfe Schneide im Ausgangszustand zu sehen ist. Des Weiteren verlaufen entlang der Wate parallele Schleifspuren bis zur Schneidenspitze. Im Vergleich hierzu ist bei der Schneide in der Draufsicht ähnlich zum Querschnitt nach fünfzig Zyklen (Abb. 107d), eine signifikante Kantenverrundung identifizierbar. Neben der Kantenverrundung sind deutliche Verschleißspuren an der Schneide zu sehen. Diese verlaufen entlang der Schneide. Ein ähnliches Verhalten ist in der Seitenansicht zu sehen. Im Ausgangszustand sind die vorher erwähnten Schleifspuren zu erkennen (Abb. 107e). Nach dem fünfzigsten Zyklus liegen neben den Schleifspuren, die deutlich schwächer geworden sind, Verschleißspuren an der Schneide vor (Abb. 107f).

Abbildung 108 zeigt die REM-Aufnahmen der Repurpose-Hakenklinge aus X153CrMoV12 (1.2379) mit der Karbidausrichtung längs zur Schneide. Im Querschnitt des Ausgangszustandes konnte eine

Kantenverrundung von $6\text{ }\mu\text{m}$ gemessen werden (Abb. 108a). An der Spitze der Schneide ist darüber hinaus ein Grat zu identifizieren. Mit einem prozentualen Zuwachs von 400 Prozent weist die Schneide nach fünfzig Zyklen eine Kantenverrundung von $24\text{ }\mu\text{m}$ auf (Abb. 108b). Bei der Betrachtung des Ausgangszustandes der Schneide in der Draufsicht (Abb. 108c) ist ebenfalls ein Grat entlang der Schneide zu sehen. Ähnlich wie bei der konventionellen Hakenklinge aus 75Cr1 (1.2003) liegen an der Wate Schleifspuren bis zur Schneide vor. Die Schneide nach dem fünfzigsten Zyklus ist in Abbildung 108d) dargestellt. Anstatt des Grates im Ausgangszustand ist nach dem 50 Zyklus eine Kantenverrundung mit leichten Verschleißspuren zu sehen. Die Seitenansicht der Schneide zeigt im Ausgangszustand (Abb. 108e) und nach den Versuchen (Abb. 108f) ein ähnliches Bild. Im Vergleich zur Seitenansicht der konventionellen Hakenklinge weist die Repurpose-Hakenklinge nach fünfzig Zyklen signifikant weniger Verschleißspuren auf.

Die Schneide der Repurpose-Hakenklinge aus X153CrMoV12 (1.2379) mit der Karbidausrichtung quer zeigt ein ähnliches Verhalten zu der Karbidausrichtung längs. Im Querschnitt des Ausgangszustandes ist ebenfalls ein Grat zu sehen und die Kantenverrundung wurde mit $13\text{ }\mu\text{m}$ gemessen (Abb. 109a). Nach den fünfzig durchgeführten Schnitten liegt die Kantenverrundung bei $26\text{ }\mu\text{m}$, was einem Zuwachs von 200 Prozent entspricht (Abb. 108b). In der Drauf- (Abb. 108c und d) und Seitenansicht (108e und f) der Schneide ist zu sehen, dass im Ausgangszustand ebenfalls ein Grat vorliegt und nach dem fünfzigsten Zyklus eine Kantenverrundung mit leichten Verschleißspuren zu sehen sind.

Neben der optischen Betrachtung der Hakenklingen wurde ebenfalls die Geometrie der Schneiden dokumentiert. Die gemessenen Werte der Schneidengeometrie im Ausgangszustand und verschlissenen Zustand sind in Tabelle 25 aufgelistet. Auffällig ist, dass die Hakenklingen beim Schneidenwinkel mit 54° und 55° keinen signifikanten Unterschied aufzeigen, bei der Schneidendicke und Schneidenlänge jedoch einen Unterschied vorliegt. Die Schneide der konventionellen Hakenklinge hat eine Dicke von $1,8\text{ mm}$, wohingegen die Repurpose-Hakenklingen eine Dicke von $2,7\text{ mm}$ haben. Die Schneidenlänge der konventionellen Hakenklinge im Ausgangszustand lag bei $3,2\text{ mm}$. Im verschlissenen Zustand beträgt die Länge $2,5\text{ mm}$, was einer Differenz von $0,7\text{ mm}$ entspricht. Die Länge der Repurpose-Hakenklingen verringert sich nach 50 Zyklen lediglich um $0,3\text{ mm}$.

4.8 Wärmeleitfähigkeit und spezifischer elektrischer Widerstand

Die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit λ , der Massendichte ρ_m , der spezifischen Wärmekapazität c_p und der Temperaturleitfähigkeit a sind in der Abbildung 110 graphisch dargestellt. Die exakten Werte mit den dazugehörigen Standardabweichungen sind Tabelle 26 bis Y zu entnehmen. Die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit in Abbildung 110a zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit des 80CrV2 (1.2235) mit steigender Messtemperatur abnimmt. Die Wärmeleitfähigkeit beträgt $(39,29 \pm 0,25)\text{ W/(mK)}$ bis

zur Messtemperatur von 180 °C. Diese fällt anschließend bis auf $(30,20 \pm 0,22) \text{ W/(mK)}$ bei einer Temperatur von 500 °C. Auffällig ist, dass die ermittelte Wärmeleitfähigkeit bei der Messtemperatur von 300° mit $(21,53 \pm 0,22) \text{ W/(mK)}$ signifikant unterhalb der Messwerte bei tieferen Temperaturen liegt und anschließend wieder ansteigt. Der HS6-5-2C (1.3343) und der X153CrMoV12 (1.2379) weisen eine geringere Wärmeleitfähigkeit gegenüber des 80CrV2 (1.2235) auf. Die Wärmeleitfähigkeit steigt bei beiden Werkstoffen bis zu der Messtemperatur von 400 °C geringfügig an und fällt anschließend wieder ab.

Die temperaturabhängige Massendichte ρ_m ist in Abbildung 110b zu sehen. Die gemessene Dichte der drei verschiedenen Werkstoffe weist über die steigende Messtemperatur einen ähnlichen Verlauf auf. Die Dichte des HS6-5-2C liegt mit $8,07 \text{ g cm}^{-3}$ bei 60 °C deutlich höher als die Dichte des X153CrMoV12 mit $7,69 \text{ g cm}^{-3}$. Die höhere Dichte ist auf die mit signifikanten Anteil im Schnellarbeitsstahl enthaltenen schweren Elemente wie Wolfram und Molybdän zurückzuführen (Kap. 4.1.3). In Abbildung 110c sind die Ergebnisse der Wärmekapazität aufgetragen. Diese steigt bei allen Werkstoffen über die Temperatur kontinuierlich an. Lediglich der Werkstoff 80CrV2 (1.2235) weist bei der Messtemperatur von 300 °C einen signifikant geringeren Wert auf. Bei den Ergebnissen der Temperaturleitfähigkeit zeigt sich in Abbildung 110d, dass sich diese mit steigender Messtemperatur bei allen Werkstoffen reduziert. Hierbei ist jedoch zu sehen, dass sich die Temperaturleitfähigkeit des 80CrV2 (1.2235) am deutlichsten reduziert.

Den Tabellen 27 und 28 sind die Ergebnisse des spezifischen elektrischen Widerstandes und des elektrischen Anteils der Wärmeleitfähigkeit zu entnehmen. Diese sind ebenfalls in Abbildung 111 graphisch dargestellt. Da für diese Messungen Proben in Abhängigkeit der Karbidrichtung des X153CrMoV12 (1.2379) entnommen werden konnten (Kap. 3.10), sind zwei Messreihen für diesen Werkstoff über die Messtemperaturen aufgetragen. Bei den Ergebnissen des spezifischen elektrischen Widerstandes ist zu sehen (Abb. 111a), dass der Werkstoff 80CrV2 (1.2235) den niedrigsten elektrischen Widerstand aufweist. Bei allen Werkstoffen steigt der Widerstand über die Temperatur an. Der 80CrV2 (1.2235) weist zwischen den Messtemperaturen 200 °C und 300 °C keinen Anstieg des spezifischen elektrischen Widerstandes auf. Bei den zwei Karbidausrichtungen des X153CrMoV12 (1.2379) ist ein kontinuierlicher Unterschied zwischen den Messergebnissen zu sehen. Der elektrische Widerstand der Proben entlang der Karbidausrichtung weist mit $0,74 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$ bei 300 °C gegenüber der senkrechten Karbidausrichtung einen geringeren Wert auf. Dieser beträgt bei der senkrechten Karbidausrichtung $0,77 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$. Der Unterschied der beiden Karbidausrichtungen ist mit einem Wert von $0,03 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$ gering, jedoch über den gesamten Anstieg der Messtemperatur vorhanden. Demnach lässt sich eine Tendenz erkennen, dass die Ausrichtung entlang der Karbidzeiligkeit den elektrischen Widerstandes des X153CrMoV12 (1.2379) verringert. Bei den Ergebnissen der elektrischen Wärmeleitfähigkeit in Abbildung 111 ist die Tendenz der Karbidausrichtung ebenfalls zu identifizieren. Mit höheren Messtemperaturen steigt die

elektrische Wärmeleitfähigkeit an. Die geringste elektrische Wärmeleitfähigkeit weist der Werkstoff X153CrMoV12 (1.2379) mit der Ausrichtung senkrecht zur Karbidzeiligkeit auf.

4.9 Härte-Anlassdiagramme

Die Abbildung 112 zeigt das erstellte Anlassdiagramm für den in dieser Arbeit verwendeten Kaltarbeitsstahl 80CrV2 (1.2235) und stellt die Härte in HV5 über der Anlasstemperatur in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) in einem Temperaturbereich von 20°C bis 500°C dar. Die gemessene Härte von 725 HV5 bei 20°C gibt die Ausgangshärte an. Bereits ab einer Temperatur von 200°C ist eine Abnahme der Härte zu verzeichnen. Zwischen 200°C und 300°C ist ein signifikanter Abfall der Härtewerte zu identifizieren. Ab Temperaturen über 300°C liegt eine nahezu lineare Härteabnahme vor. Zwischen den Anlasstemperaturen 200°C zu 300°C liegt ein Abfall der Härtewerte von etwa 80 HV5 vor, wohingegen jeweils für die weiteren 100°C -Intervalle ein Abfall von über 100 HV5 verzeichnet wird. Die geringsten Härtewerte werden somit bei der maximalen Anlasstemperatur von 500°C mit 396 HV5 gemessen.

4.10 Auswirkung auf die Umweltleistung

4.10.1 Auswirkungen von Nebenbedingungen während des Nestings

Die Ergebnisse des Nestings (Kapitel 4.3) auf die Umweltleistung der Fertigungsprozesse sind in den Gleichungen 4.4 und 4.5 dargestellt. Bei der Ausgangsanordnung des Schnittmusters (Abb. 26a) beträgt das Ergebnis 43,03 MJ Energie. Diese addiert sich zum einen aus der benötigten Energie für das Recycling des 2,75 kg schweren, übrig gebliebenen Verschnitts des Maschinenkreismessers aus X153CrMoV12 (1.2379). Zum anderen wird der Energiewert für das Wegschleifen von 930 g Material dazu addiert. Hinzu kommt abschließend noch die benötigte Energie, um das weggeschliffene Material wieder herzustellen, da derzeit keine Recyclingstrategien für Schleifspäne im industriellen Maßstab umgesetzt werden [234]. Von den aufaddierten Energiewerten wird die eingesparte Energie der gefertigten Werkzeuge subtrahiert. Hierfür wird das Gewicht der 24 Hakenklingen mit dem Energiemix des 75Cr1 (1.2003) und zusätzlich das Gewicht der vier Drechselwerkzeuge mit dem Energiemix des HS6-5-2C (1.3343) multipliziert. Dieser eingesparte Energiewert wird dem zuvor berechneten abgezogen. Bei der Rechnung für das optimierte Nesting mit den Werten aus Tabelle 14, ergibt sich eine aufzubringende Energie von 25,07 MJ (Gleichung 4.5). Somit kann durch eine geänderte Anordnung der Energieeinsatz um 17,96 MJ reduziert werden, was einer prozentualen Reduzierung von 41,73 Prozent entspricht.

$$43,04[MJ] = 2,75 \cdot 13,90 - 0,58 \cdot 103,08 - 1,14 \cdot 23,92 + 0,93 \cdot 56,80 + 0,93 \cdot 41,98 \quad (4.4)$$

$$25,07[MJ] = 2,95 \cdot 13,90 - 0,58 \cdot 103,08 - 1,14 \cdot 23,92 + 0,72 \cdot 56,80 + 0,72 \cdot 41,98 \quad (4.5)$$

4.10.2 Auswirkung einer in-situ Laserleistungsanpassung auf die WEZ und deren Nachbearbeitung

Tabelle 29 stellt die Ergebnisse der Analyse auf die Umweltleistung durch eine optimierte Laserleistungsanpassung dar. Grundlage der Berechnung ist die Probengeometrie (20 mm x 365 mm) aus Kapitel 3.3.2, die mit verschiedenen Laserleistungen aus dem Maschinenkreismesser herausgetrennt wurde. Die Daten der verschiedenen Laserleistungen sind in Tabelle 2 dargestellt. Die zu schleifende Masse ergibt sich aus der gemessenen Breite der WEZ (Kap. 4.5.2). Die Breite der WEZ wurde zwischen den Messpunkten linear interpoliert, sodass diese für die gesamte Kontur berechnet werden konnte. Zu sehen ist, dass die Bearbeitungszeit mit steigender Laserleistung zunimmt. Bedingt durch die steigende Laserleistung und die längere Bearbeitungszeit nimmt die benötigte Energie für das Schneiden einer Probe ebenfalls zu. Dasselbe Verhalten ist bei der Breite der WEZ, dem daraus resultierenden zu schleifenden Volumen oder der benötigten Energie für das Schleifen zu sehen.

Des Weiteren sind die Daten für ein optimiertes Laserschneiden, bei dem die Laserleistung kontinuierlich auf die Materialstärke angepasst wird dargestellt. Zu sehen ist, dass die Bearbeitungszeit auf 22,4 Sekunden sinkt, was einer Reduzierung zwischen 25,82 - 55,46 Prozent entspricht. Die Masse der WEZ verringert sich auf 0,809 g, sodass die benötigte Energie für das Schleifen 42,66 kJ beträgt. Gegenüber den Laserleistungen für Materialstärken von 6 mm, 8 mm und 10 mm reduziert sich die benötigte Energie für das Schleifen zwischen 37,21 - 48,79 Prozent. Die Berechnung der benötigten Energie erfolgte nach Gleichung 3.7 aus Kapitel 3.14.

4.10.3 Auswirkung der Repurpose-Strategie auf den Schleifprozess

Die Auswirkung der Repurpose-Strategie auf die Umweltleistung des veränderten Produktionsprozesses ist in Tabelle 30 zusammengefasst. Für den Vergleich der benötigten Energien wurde lediglich das zu schleifende Material berücksichtigt. Mögliche Einsparungen durch entfallene Fertigungsschritte in der Produktionsroute sind nicht quantitativ erfasst. Die Fertigungsschritte des konventionellen und Repurpose-Pappreißmesser unterscheiden sich nicht (vgl. Kap. 4.2.3 und 4.6.2). Die benötigte Energie für das Schleifen der Hakenklinge des Pappreißmessers beträgt in beiden Fertigungsrouten ca. 90 kJ. Die Fertigungsschritte des Repurpose-Drehselmeißels weicht von der konventionellen Fertigungs-

route ab (vgl. Kap. 4.2.2 und 4.6.1). In Abbildung 113 sind die Fertigungsrouten des Standard-Drechselmeißels und des High-Performance-Drechselmeißels der Fertigungsroute des Repurpose-Drechselmeißels gegenübergestellt. Zu sehen ist, dass die Wärmebehandlung und das Richten bei der Fertigungsroute des Repurpose-Drechselmeißels nicht durchgeführt wird. Somit können Fertigungsschritte während der Produktion eingespart werden. Ebenfalls muss weniger Material durch Schleifen bei der Repurpose-Route entfernt werden. Gegenüber dem Standard-Drechselmeißel mit 45,00 g und dem High-Performance mit 22,00 g, wird beim Repurpose-Drechselmeißel lediglich 4,40 g Material weggeschliffen. Somit sinkt die benötigte Energie für das Schleifen von 2178,00 kJ (Standard-Drechselmeißel) bzw. 1240,80 kJ (High-Performance-Drechselmeißel) auf 249,92 kJ für den Repurpose-Drechselmeißel, was einer Reduzierung von bis zu 88 Prozent entspricht. Die Berechnung der benötigten Energie erfolgte nach Gleichung 3.7 aus Kapitel 3.14.

5 Diskussion

5.1 Konzeptionierung eines Circular Economy Konzepts

Die Kreislaufwirtschaft verfolgt das Ziel, Ressourcen so lange wie möglich in wertschöpfenden Prozessen zu halten. Hierbei sollen sowohl der Materialeinsatz als auch die benötigte Energie minimiert werden. Um das Ziel der Kreislaufwirtschaft zu erreichen, können verschiedene 10R-Strategien eingesetzt werden. Die Unterschiede dieser Strategien sind in Kapitel 2.1.1 erläutert. Neben den Unterschieden auf der Strategieebene ist das jeweilige Vorgehen innerhalb einer Strategie zu erarbeiten, da dieses von den Produkten, Materialien und Fertigungsprozessen abhängig ist. Im Rahmen dieser Arbeit standen verschlissene Maschinenkreismesser (Kap. 4.2.1) für die Hygienepapierindustrie aus hochlegiertem Kaltarbeitsstahl X153CrMoV12 (1.2379) (Kap. 4.1.4) zur Verfügung. Während der Fertigung der Maschinenkreismesser wird viel Material und Energie benötigt. In dem hochlegierten Kaltarbeitsstahl sind neben der Eisenbasis bis zu 17,8 Ma.-% Legierungselemente enthalten (Tab. 11). Durch die hohen Gehalte an Cr, Mo und V wird 60,70 MJ [229] während der Primärherstellung des X153CrMoV12 (1.2379) für ein Kilogramm des Kaltarbeitsstahls benötigt (Tab. 7). Zusätzlich zu der benötigten Energie für die Herstellung des Werkstoffs kommen die benötigten Energien der durchgeführten Fertigungsprozesse hinzu. Hierzu gehören unter anderem das Abgießen als Strang oder zu Brammen und das anschließende Walzen auf die gewünschte Blechstärke. Während des Fertigungsprozesses der Maschinenkreismesser kommen weitere Fertigungsschritte hinzu, die zum Teil energieintensiv sind. Für das Einstellen der Materialeigenschaften durchlaufen die Rohlinge der Maschinenkreismesser eine Wärmebehandlung. Hierbei wird das Material zuerst bei 1020 °C austenitisiert und anschließend abgeschreckt (Kap. 4.1.4). Anschließend werden die Rohlinge der Maschinenkreismesser dreimal für je acht Stunden bei 520 °C angelassen.

Neben der Wärmebehandlung ist das Schleifen der Maschinenkreismesser ein weiterer energieintensiver Fertigungsprozess. Für das Schleifen eines Kilogramms des X153CrMoV12 (1.2379) wird 56,80 MJ Energie benötigt [229]. Das Gewicht der Maschinenkreismesser halbiert sich während des Schleifprozesses durch das Plan- und Wateschleifen [40, 234]. Hierbei fallen je nach Größe der Kreismesser (Tab. 12) zwischen sechs und zwölf Kilogramm metallische Schleifspäne an. Diese liegen allerdings verunreinigt vor, was eine Rückführung der metallischen Schleifspäne in eine Kreislaufwirtschaft erschwert. Die

Nutzung der einzelnen Schleifschlammbestandteile ist weitestgehend unerforscht. Bisherige Forschungen fokussierten die Kühlschmierstoffaufbereitung bzw. -rückführung [235–237] und die Verwendung von Schleifschlamm als gesamtes Gemisch innerhalb von Weiterverarbeitungsprozessen (beispielsweise Prozesse der Pulvermetallurgie) [238, 239]. Diese Arbeiten belegten, dass die Verwendung des gesamten Schleifschlammgemisches die Qualität der Rohstoffe negativ beeinflusst. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden die Zusammensetzung und der Einfluss der Bestandteile auf den Fertigungsprozess des Schleifschlammes genauer untersucht. Erst in den letzten Jahren wurde die technische Separierung von Schleifschlamm, die Charakterisierung der einzelnen Bestandteile und die anschließende Weiterverarbeitung wissenschaftlich untersucht [234, 240–242]. Es wurde gezeigt, dass die Separierung und Wiederverwendung der metallischen Schleifspäne möglich ist, dies jedoch mit hohem technischen Aufwand einhergeht. Da das Ziel der Kreislaufwirtschaft die Wiederverwendung von Ressourcen mit geringem Energieaufwand ist, sollte demnach die Entstehung von Schleifschlamm minimiert werden. In vielen Fertigungsprozessen ist dies derzeit jedoch nicht möglich, sodass eine Verlängerung der Nutzungsdauer dieser Produkte oder Ressourcen anzustreben ist. Da die Lebensdauer der Maschinenkreismesser im niedrigen dreistelligen Stundenbereich liegt (siehe Kapitel 4.2.1), bevor diese verschlissen und entsorgt werden, ist das Verhältnis zwischen dem Energieaufwand für die Herstellung und der Nutzungsdauer nicht nachhaltig.

Im Falle der Maschinenkreismesser kann sowohl die Strategie des Remanufacturings als auch die Strategie des Repurposings angewendet werden [13, 40, 243, 244]. Beim Remanufacturing werden die größeren Maschinenkreismesser im verschlissenen Zustand als Rohling für die Herstellung eines kleineren verwendet, sodass die Funktion des Produktes bestehen bleibt [40, 243]. Da die größeren Maschinenkreismesser dickere Materialstärken und kleinere Zentralbohrungen aufweisen, ist dies möglich (Tab. 12). Für die zuvor angesprochene Reduzierung des Schleifschlammes werden die unterschiedlichen Durchmesser der verschlissenen Kreismesser auf ein einheitliches Maß für das nächstkleinere Maschinenkreismesser geschnitten. Der anschließende Schleifprozess muss technisch angepasst werden, da die Rohlinge keine durchgängige Materialstärke aufweisen [243]. Die Nutzung und Erweiterung bestehender Technologien sind Teil der zweiten Gruppe der 10R-Strategien, in die das Remanufacturing eingeordnet ist (Abb. 1) [13]. Die kleinsten 611er Maschinenkreismesser können im verschlissenen Zustand nicht in der Remanufacturing-Strategie verwendet werden, da das Unternehmen keine kleineren Maschinenkreismesser im Produktportfolio führt. Die verschlissenen 611er Maschinenkreismesser wiesen jedoch noch ein Gewicht von ca. fünf Kilogramm hochlegiertem Kaltarbeitsstahl auf. Um dieses bereits hergestellte Material noch nicht in der Recycling-Strategie zu verwerten, kann die Repurpose-Strategie angewendet werden. Diese weist gegenüber dem Recycling einen höheren Zirkularitätsgrad auf [13].

Konzeptionierung der Repurpose-Strategie

Wie bereits erwähnt, werden bei der Repurpose-Strategie Baugruppen, Bauteile oder die Materialien eines Produktes für neue Produkte mit einer geänderten Funktion wiederverwendet [13]. Da das Maschinenkreismesser lediglich aus einem Bauteil besteht (Kap. 4.2.1), muss Material aus diesem entnommen und für die Herstellung von anderen Repurpose-Produkten zur Verfügung gestellt werden. Hierzu müssen trennende Fertigungsverfahren ausgewählt werden, mit denen es möglich ist, aus bis zu 5 mm dickem gehärtetem Werkzeugstahl Rohlinge für Repurpose-Produkte zu entnehmen. Diese müssen anschließend an einer geeigneten Stelle in die konventionelle Fertigungsroute integriert werden. Des Weiteren müssen Repurpose-Produkte ausgewählt werden, die aus dem zur Verfügung stehenden Volumen des Sekundärmaterials entnommen werden können. Die Materialeigenschaften des X153CrMoV12 (1.2379) müssen bei der Repurpose-Werkzeugauswahl ebenfalls berücksichtigt werden, sodass die Funktionalität der Repurpose-Produkte gewährleistet ist. Im Folgenden werden die Auswahl der Repurpose-Produkte in Abhängigkeit des Sekundärmaterials, die Möglichkeit der Materialentnahme und der Einfluss des Sekundärmaterials auf die Fertigungsroute betrachtet.

5.1.1 Berücksichtigung des Sekundärmaterials für mögliche Repurpose-Produkte

In einer Linearwirtschaft ist die Materialauswahl im Konstruktionsprozess integriert, der wiederum ein Teil der Produktentwicklung ist [245]. In der ersten Phase des Materialauswahlprozesses wird eine Materialanforderungsliste erstellt, mit der in der zweiten Phase mögliche Materialien ausgewählt werden können [245, 246]. In der Materialanforderungsliste werden alle Ziele, Forderungen und gegebenenfalls Wünsche an den Werkstoff aufgelistet und mit Zielgrößen versehen [245]. Da in der Linearwirtschaft die Werkstoffe anhand dieser vorher erstellen Materialanforderungsliste ausgewählt werden können, ist es möglich, auf jeden zur Verfügung stehenden Werkstoff zurückzugreifen oder neue Werkstoffe speziell für diese Anforderung entwickeln zu lassen. Da im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft Sekundärmaterial mit unterschiedlichen Materialeigenschaften zur Verfügung steht, müssen anhand der vorliegenden Materialeigenschaften Produkte ausgewählt werden, die diese Materialanforderungen benötigen. Demnach wird nicht das Material anhand der Anforderungen des Produktes ausgewählt, sondern das Produkt anhand der bestehenden Materialeigenschaften.

Das im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung stehende Sekundärmaterial ist der hochlegierte Kaltarbeitsstahl X153CrMoV12 (1.2379), der vorwiegend für Schneid- oder Formwerkzeuge verwendet wird [45]. Dieser liegt im gehärteten und anschließend im Sekundärhärtemaximum angelassenen Zustand vor. Durch die hohe Härte von (749 ± 9) HV5 und den in der Matrix eingebundenen Hartphasen weist der Stahl X153CrMoV12 (1.2379) eine hohe Verschleißbeständigkeit gegen Abrasion auf [45, 51]. Kaltarbeitsstähle werden üblicherweise bis zu einer Einsatztemperatur von 200 °C eingesetzt, sodass ein

mögliches Repurpose-Produkt vorwiegend bei Raumtemperatur verwendet werden sollte. Bei der Fertigung der Maschinenkreismesser wird der Kaltarbeitsstahl X153CrMoV12 (1.2379) dreimal im Sekundärhärtemaximum bei 520 °C angelassen (Kap. 4.1.4). Hierdurch können auch Repurpose-Werkzeuge ausgewählt werden, die bei Temperaturen bis zu 520 °C eingesetzt werden, da das Sekundärmaterial eine Anlassbeständigkeit bis zu dieser Temperatur aufweist. Neben der Härte, der Verschleißbeständigkeit und der möglichen Einsatztemperatur spielen weitere Materialeigenschaften eine wichtige Rolle. Die geringe Schlagarbeit von 9 J bis 12 J des X153CrMoV12 (1.2379) zeigt, dass keine Repurpose-Produkte mit schlagender Belastung gewählt werden können, da eine erhöhte Bruchgefahr durch das spröde Verhalten vorliegt [247]. Des Weiteren können keine Repurpose-Produkte gewählt werden, bei denen eine hohe Korrosionsbeständigkeit gefordert wird, was medizinische Produkte ausschließt. Zwar weist der Stahl ausreichende Mengen an Cr für eine mögliche Korrosionsbeständigkeit auf, dieser ist jedoch in den Cr-reichen Hartphasen vom Typ M_7C_3 und $M_{23}C_6$ abgebunden und steht somit nicht in der Matrix zur Passivschichtbildung zur Verfügung [45]. Die vorhandenen Materialeigenschaften des X153CrMoV12 (1.2379) können zum Teil durch eine erneute Wärmebehandlung verändert werden, das erneute Durchführen von energieintensiven Prozessen soll jedoch in einer Kreislaufwirtschaft vermieden werden (Kap. 2.1).

Neben den bestehenden Materialeigenschaften des Sekundärmaterials muss bei der Produktauswahl das vorhandene Materialvolumen berücksichtigt werden. Die verschlissenen 611er Maschinenkreismesser weisen in der Mitte, dem sogenannten Flanschbereich, eine gleichbleibende Materialstärke von 5 mm auf (Kap. 4.2.1). In dem Flanschbereich befinden sich jedoch Bohrungen, die für den Betrieb des Maschinenkreismessers benötigt werden. In dem umliegenden Watebereich nimmt die Materialstärke von 5 mm auf nahezu 0 mm an der Schneide ab. Der Durchmesser der verschlissenen Kreismesser variiert zwischen 500 mm und 600 mm. Dieser unterscheidet sich je nach Anwender, da diese verschiedene Kenngrößen für den Verschleißzustand definieren. Eine dieser Kenngrößen ist z. B. der größer werdende Schneidkeil. Durch den größeren Schneidkeil erhöht sich der Materialverlust des Hygienepapiers pro Schnitt, die Schnittqualität lässt nach und die benötigte Schnittkraft nimmt zu, wodurch der Schneidprozess unwirtschaftlich wird. Da der Watebereich eine abnehmende Materialstärke aufweist, ist dies bei der Auswahl der Repurpose-Werkzeuge zu berücksichtigen. Diese Kontur einer abnehmenden Materialstärke weisen in der Regel handgeführte Schneidwaren auf [248, 249]. Für die Konzeptionierung der Repurpose-Strategie, bei der die verschlissenen Maschinenkreismesser als Sekundärmaterial eingesetzt werden sollen, wurden Hakenklingen für Pappreißmesser und Drechselmeißel ausgewählt. Die Pappreißmesser werden für abrasive Schneidprozesse bei Raumtemperatur eingesetzt. Die Rohlinge hierfür sollen aus dem Watebereich des verschlissenen Maschinenkreismessers entnommen werden. Für Anwendungen bei erhöhten Temperaturen werden Rohlinge für Drechselmeißel aus dem Flanschbereich entnommen, da diese eine gleichbleibende Materialstärke benötigen.

Bezogen auf die Auswahl von Produkten in einer Repurpose-Strategie unter Berücksichtigung des Sekundärmaterials können folgende Schlussfolgerungen zusammengefasst werden:

- Entgegen der Linearwirtschaft, bei der Materialien anhand der Produkthanforderungen ausgewählt werden, müssen bei der Umsetzung einer Repurpose-Strategie Produkte anhand der vorliegenden Materialeigenschaften des Sekundärmaterials gewählt werden.
- Zu den entscheidenden Materialeigenschaften zählen unter anderem die Verschleißbeständigkeit, die Härte, die Zähigkeit, die Korrosionsbeständigkeit aber auch die Anlassbeständigkeit.
- Die Abmaße der Repurpose-Rohlinge dürfen das Volumen des vorhandenen Sekundärmaterials nicht überschreiten, sodass die Rohlinge aus dem Sekundärmaterial entnommen werden können.

5.1.2 Trennende Fertigungsverfahren in der Repurpose-Strategie

Bei der Repurpose-Strategie werden Baugruppen, Bauteile und Materialien von verschlissenen, defekten oder aussortierten Produkten in neuen Produkten mit geänderter Funktion eingesetzt [13]. Um die einzelnen Komponenten als Sekundärmaterial in einer Repurpose-Strategie wiederverwenden zu können, müssen diese durch trennende Fertigungsverfahren nutzbar gemacht werden. In der Literatur werden Fertigungsverfahren, die nach Norm DIN 8580 in der Gruppe 3.5 eingeordnet sind (Kap. 2.4), als vorteilhafte Verfahren für eine Kreislaufwirtschaft bezeichnet [136, 137]. Das Zerlegen bezeichnet das Trennen von zuvor gefügten Werkstücken ohne stoffliche Verbindung, sodass eine sortenreine Materialsortierung möglich ist (Kap. 2.4.5). Ein verringerter Demontageaufwand führt dazu, dass die Wiederverwendung von Baugruppen, Bauteilen und Materialien für eine Repurpose-Strategie gegenüber dem Recycling oder der Entsorgung bevorzugt wird [136, 137]. Das Zerlegen wird hauptsächlich in den 10R-Strategien „Repair“ und „Refurbish“ angewendet [250]. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde eine Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG entwickelt [251].

Das in dieser Arbeit zur Verfügung stehende Sekundärmaterial besteht nur aus einem Bauteil, sodass keines der Fertigungsverfahren aus der Gruppe des Zerlegens angewendet werden konnte. Da das Sekundärmaterial aus 5 mm dickem gehärteten Stahl besteht, müssen Fertigungsverfahren gewählt werden, die das vorliegende Material trennen können. Neben der technischen Möglichkeit, das vorliegende Material zu trennen, muss das trennende Fertigungsverfahren definierte Konturen aus den Maschinenkreismessern herauszutrennen. Da die Rohlinge der Repurpose-Werkzeuge keine rechtwinklige Geometrie aufweisen (Kap. 4.2.2 und 4.2.3), muss die Entnahme von Konturen mit enthaltenen Winkeln und Radien zusätzlich möglich sein. Um eine nachfolgende Bearbeitung zu reduzieren, sollten auch mögliche Bohrungen mit in das Material eingebracht werden können. Des Weiteren sollte eine hohe Flexibilität zum Herausschneiden verschiedener Konturen möglich sein.

Demnach muss das trennende Fertigungsverfahren definierte Konturen aus 5 mm dickem Stahl heraustrennen können.

Die Verfahren Scher-, Messer- oder Beißschneiden eignen sich für das Trennen von Blechen. Die Werkstücke, die mittels dieser Schneidverfahren bearbeitet werden, dürfen einen spezifischen Schneidwiderstand von 1500 N mm^{-2} nicht überschreiten [252]. Der nach Formel 2.2 berechnete Schneidwiderstand k_s für den Werkstoff X153CrMoV12 (1.2379) beträgt 1680 N mm^{-2} und liegt somit über der angegebenen Grenze von 1500 N mm^{-2} . Für die Berechnung wurde die untere Grenze der Zugfestigkeit von 2100 N mm^{-2} aus der Datenbank CES Selector verwendet [229]. Im weichgeglühten Zustand beträgt die Zugfestigkeit lediglich 830 N mm^{-2} , sodass sich ein Schneidwiderstand von 664 N mm^{-2} ergibt. Wird mit dem Schneidwiderstand des weichgeglühten Zustandes, einer maximalen Materialstärke von 5 mm, dem Umfang eines Drechselmeißels von 460 mm und einer erforderlichen Sicherheit von 20 Prozent die maximale Schneidkraft F_s berechnet, beträgt diese 1832 kN. Zwar existieren Maschinen auf dem Markt, die Schneidkräfte bis zu 2000 kN aufbringen können, das zuvor notwendige Weichglühen ist jedoch das primäre Ziel der Repurpose-Strategie. Hierdurch wäre neben dem energieintensiven Weichglühen ein erneutes Härten und Anlassen der Werkzeuge notwendig, wofür ebenfalls eine hohe Menge an Energie benötigt wird. Da das Schneiden im gehärteten Zustand technisch nicht möglich ist und das benötigte Weichglühen zu energieintensiv ist, können keine Verfahren aus der Gruppe 3.1 nach Norm DIN 8580 verwendet werden (Kap. 2.4.1). Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Fertigungsmaschinen besteht die Möglichkeit, in Zukunft auf Maschinen mit ausreichenden Schneidleistungen für den gehärteten Zustand zurückzugreifen. Hierbei besteht allerdings die Gefahr, dass das zu schneidende Sekundärmaterial durch seine spröden Materialeigenschaften zersplittert. Die Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide werden für die Bearbeitung von ur- und umgeformten Bauteilen eingesetzt und dienen nicht für das wirtschaftliche Ausschneiden von Geometrien aus Blechtafeln, auch wenn dies zum Teil technisch möglich wäre (Kap. 2.4.2).

Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide werden hauptsächlich für eine abschließende Verbesserung der Oberflächenqualität und nicht für das Heraustrennen von Geometrien verwendet [95]. Eine Ausnahme stellt das (Abrasive)-Wasserstrahlschneiden dar, das ebenfalls in die Gruppe dieser Fertigungsverfahren nach Norm DIN 8580 eingeordnet ist (Kap. 2.4.3). Durch das Beimischen von Abrasivpartikeln in den Wasserstrahl ist es mit diesem Verfahren möglich, aus den verschlissenen Maschinenkreismessern Geometrien herauszutrennen. Durch die Möglichkeit, den Schneidkopf über CNC-gesteuerte X-, Y- und Z-Achsen zu verfahren, können beliebige Geometrien aus gehärtetem Werkzeugstahl ausgeschnitten werden [253, 254].

Die Anlagentechnik einiger der nach Norm DIN 8580 in die Gruppe *Abtragen* eingeordnete Fertigungsverfahren weisen ähnliche Anlagentechnik wie die des Wasserstrahlschneidens auf (Kap. 2.4.4).

Die Schneidköpfe bzw. -brenner der Verfahren Brennschneiden, Plasmaschneiden und Laserschneiden können ebenfalls über CNC-gesteuerte Achsen verfahren werden, sodass eine definierte Kontur entnommen werden kann [253, 254]. Mit den genannten Verfahren ist neben der definierten Kontur ebenfalls das Ausschneiden aus 5 mm dickem gehärteten Werkzeugstahl möglich. Entscheidend für die Auswahl eines dieser Fertigungsverfahren ist die zu erreichende Schnittqualität und die Wirtschaftlichkeit des Prozesses [255–257]. Gegenüber dem Brennschneiden können mittels Laserschneiden höhere Schnittqualitäten und filigranere Geometrien ausgeschnitten werden, was die Nacharbeit bei der Fertigung der Repurpose-Produkte reduziert. Das Plasmaschneiden ist gegenüber dem Laserschneiden teurer, sodass das Laserschneiden wirtschaftlicher in der Repurpose-Strategie ist. Da sowohl das Wasserstrahlabrasiv-Schneiden als auch das Laserschneiden dafür verwendet werden können, wirtschaftlich aus gehärtetem Werkzeugstahl komplexe Geometrien zu entnehmen, wurden diese beide Verfahren in dieser Arbeit verglichen und auf die Eignung in der Repurpose-Strategie hin analysiert (Kap. 3.3).

Die Anlagensteuerung ist sowohl beim Wasserstrahlabrasiv-Schneiden als auch beim Laserschneiden auf eine effiziente Fertigung in der Linearwirtschaft ausgelegt. Beide Verfahren werden in der metallverarbeitenden Industrie eingesetzt, um aus Blechtafeln Bauteile mit definierten Konturen auszuschneiden (Kap. 2.4). Hierfür werden Blechtafeln mit einheitlicher Materialstärke den Schneidanlagen zugeführt und ausgeschnitten. Bei der Arbeitsvorbereitung werden hierzu Schnittmuster durch das Nesting erstellt. Beide Verfahren weisen je nach zu schneidendem Materialtyp und Materialstärke Vor- und Nachteile auf. Laut Literatur sind die Vorteile des Wasserstrahlschneidens, dass keine Wärmeeinflusszone und keine Aufhärtung entlang der Schnittfläche vorliegt [119]. Da keine thermische Beeinflussung und somit keine thermischen Spannungen eingebracht werden, wird das Wasserstrahlschneiden als Verfahren bezeichnet, bei dem keine Materialspannungen erzeugt und somit Rissbildung vermieden wird (Kap. 2.4.3). Als Nachteil werden die zum Teil geringen Schnittgeschwindigkeiten, die materialbedingte Korrosion durch den direkten Wasserkontakt und die Entsorgung des Abrasivpartikel-Metallspan-Gemisches aufgeführt. Zu den Vorteilen in der Literatur beim Laserschneiden zählen die hohen Schnittgeschwindigkeiten und Qualitäten bei dünnen Blechen (Kap. 2.4.4). Nachteilig ist der Wärmeeintrag in das Gefüge, die daraus resultierenden thermischen Spannungen und die mögliche Rissbildung.

Entnahme von Rohlingen im Flanschbereich

Mit den durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sowohl das Wasserstrahlabrasiv- als auch das Laserschneiden dafür verwendet werden können, Rohlinge für Repurpose-Werkzeuge aus

dem Flanschbereich eines Maschinenkreismessers herauszuschneiden (Kap. 4.5). Die Schnittkanten weisen die verfahrenstypischen Merkmale auf. Die Schnittfläche der mit einem Wasserstrahl geschnittenen Probe weist leichte Korrosion auf (Abb. 33a). Des Weiteren ist das sogenannte Rillennachlaufen über die Materialstärke zu sehen (Kap. 2.4.3). In Abbildung 33a ist sichtbar, dass der Schnitt von rechts nach links erfolgte. Die Schnittfläche weist darüber hinaus deutliche Verschleißspuren durch die im Wasserstrahl enthaltenen Abrasivpartikel auf (Abb. 33b). An der Strahleintrittsseite sind neben der Kantenverrundung auch Stellen zu sehen, an denen die im Wasserstrahl enthaltenen Abrasivpartikel auf die Materialoberfläche treffen. Die Schnittfläche der lasergeschnittenen Probe weist gegenüber der mit einem Wasserstrahl geschnittenen Fläche ein geringeres Nachlaufen der Rillen auf (Abb. 36a), was für eine höhere Schnittqualität spricht. In der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme der Schnittfläche sind die für das Verfahren typischen Risse in der Oberfläche zu sehen (Abb. 36b) [258]. Diese können im späteren Einsatz der Repurpose-Werkzeuge ein Bauteilversagen begünstigen. Hierfür müssen die Schnittflächen der lasergeschnittenen Rohlinge abgeschliffen werden, sodass keine Risse mehr in der Oberfläche vorliegen. Neben den Rissen in der Schnittfläche kann die Wärmeeinflusszone entlang der Schnittfläche ein Bauteilversagen begünstigen oder die Funktion der Repurpose-Werkzeuge verschlechtern. Durch die Aufhärtung in der Randzone (Abb. 44) kann es ebenfalls zu sprödem Materialverhalten und somit zum Bauteilversagen kommen. Eine Verschlechterung der Funktionalität kann mit dem veränderten Gefüge in der Randzone einhergehen. Während des Laserschneidens wird das Material aufgeschmolzen und ausgeblasen. In Abbildung 45 ist das Gefüge entlang der Schnittfläche mit 3000-facher Vergrößerung zu sehen. Im Bereich bis ca. 40 µm ist das aufgeschmolzene und wiedererstarrte Gefüge sichtbar. In diesem Bereich liegen feine Metallzellen umgeben von einem Karbidnetzwerk vor. Mit höherem Randabstand sind darüber hinaus angeschmolzene Karbide zu sehen. Dieser Bereich muss durch das Schleifen vollständig entfernt werden, da dieses Gefüge nicht die gewünschten Materialeigenschaften aufweist. Neben dem aufgehärteten Bereich, der nachgewiesen werden konnte (Kap. 4.5.2), sollte ein Anlassbereich mit geringerer Härte vorliegen. Dieser konnte jedoch aufgrund seiner geringeren Breite nicht mit den zur Verfügung stehenden Verfahren identifiziert werden. Ein weicherer Bereich ist ebenfalls nachteilig, sollte dieser im späteren Repurpose-Produkt an der Funktionsfläche vorliegen. Demnach ist neben dem Wegschleifen der Risse in der Schnittfläche das Wegschleifen der gesamten Wärmeeinflusszone notwendig.

Entnahme von Rohlingen im Watebereich

Neben der Probenentnahme im Flanschbereich der verschlissenen Maschinenkreismesser müssen darüber hinaus Rohlinge aus dem Watebereich entnommen werden. In Abbildung 32b ist ein mit dem Wasserstrahl geschnittenes Maschinenkreismesser zu sehen. Erkennbar sind die Ausschnitte von drei

Hakenklingen-Rohlingen, die am Übergang zwischen dem Flansch- und dem Watebereich angeordnet sind. Zu sehen ist, dass ein Riss durch die Rohlinge entlang von Spannungswalzzlinien verläuft. In Abbildung 34 ist dieser Ausschnitt vergrößert dargestellt. Die weitere Entnahme von Rohlingen aus dem Flanschbereich ist somit nicht möglich. Das Wasserstrahlabrasiv-Schneiden zeichnet sich dadurch aus, dass durch kinetische Energie beim Auftreffen der Abrasivpartikel eine plastische Verformung an der Materialoberfläche verursacht und durch die örtlich begrenzte Zerstörung Material abgelöst wird (Kap. 2.4.3). Der Schneidprozess erfolgte mit einem Druck von 3600 bar (Kap. 3.3.1). Beim Wasserstrahlschneiden in der Linearwirtschaft werden, wie bereits erwähnt, Blechtafeln mit einheitlicher Materialstärke, die durchgängig auf dem Maschinenbett auflegen, ausgeschnitten. Das Maschinenkreismesser jedoch liegt nur an seiner dicksten Stelle, dem mittleren Flanschbereich, auf dem Maschinenbett auf. Zusätzlich wurde das verschlissene Maschinenkreismesser an den vorhandenen Bohrungen verschraubt, sodass es während des Schneidprozesses in Position bleibt. Schneidet der Wasserstrahl während des Ausschneidens im Bereich der Wate, liegt das Maschinenkreismesser nicht mehr in diesem Bereich auf dem Maschinenbett auf. Hierdurch wird die Wate des Messers in Richtung des Maschinenbett gedrückt, sodass das Maschinenkreismesser verkippen könnte. Da der Flanschbereich auf dem Maschinenbett verschraubt ist, wirkt dieser als feste Einspannung, sodass nur der Watebereich in Richtung des Maschinenbetts gedrückt wird. Diese Biegung bewirkt ein Anstieg der im Maschinenkreismesser vorliegenden Spannungen, die eine kritische Höhe erreichen und anschließend zum Bauteilversagen führen. Die durchgeführte FEM-Simulation hat gezeigt, dass die maximale Spannung im Übergang zwischen dem Flansch- und Watebereich vorliegt (Abb. 35). Je weiter der Wasserstrahl in Richtung des Außendurchmesser fährt, desto länger ist der wirkende Hebelarm und somit die vorliegende Spannung [259]. Für die Funktionsfähigkeit der Maschinenkreismesser werden im Fertigungsprozess sogenannte Spannungswalzringe eingebracht, die ein Flattern der Maschinenkreismesser verhindern sollen (Kap. 2.5.1). Hierbei werden umlaufend Eigenspannungen durch das Spannungswalzen eingebracht, die in den Spannungswalzzlinien vorliegen. Die Anzahl und die Position dieser Spannungswalzzlinien variiert je nach Maschinenkreismesser. Des Weiteren werden bei einem späteren Richtprozess weitere Eigenspannung in die Maschinenkreismesser eingebracht. Demnach liegen bereits im gesamten Maschinenkreismesser hohe Eigenspannungen vor, die durch die Wasserstrahl induzierte Biegung weiter steigen. In den Spannungswalzzlinien wird die kritische Spannung durch das Überlagern der bereits eingebrachten und der neu induzierten Biegespannungen überschritten, sodass es zum Bruch kommt. Die Höhe dieser kritischen Spannung konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden, da keine geeigneten Methoden zur Verfügung standen. Der entstandene Riss verläuft wie in Abbildung 34 zu sehen entlang einer Spannungswalzzlinie. Das Reißen konnte bei jedem mit dem Wasserstrahl geschnittenen Maschinenkreismesser betrachtet werden. Während des Laserschneidens sind keine Risse während des Ausschneidens entstanden, sodass das gesamte Maschinenkreismesser als

Sekundärmaterial verwendet werden kann. Das Verfahren des Laserschneidens beruht auf der Absorption der Energie des Laserstrahls, sodass das Material aufgeschmolzen wird. Hierdurch wird kein mechanischer Druck auf den Watebereich aufgebracht, wodurch keine zusätzlichen Biegespannungen durch den Laserstrahl eingebracht werden (Kap. 2.4.4). Während des Laserschneidens wirkt lediglich der Gasdruck von 13 bar, der zum Ausblasen der Schmelze benötigt wird (Tab. 2). Gegenüber den 3600 bar des Wasserstrahlschneidprozesses (Kap. 3.3.1), reicht der Gasdruck während des Laserschneidens nicht aus, um kritische Biegespannungen in das Material einzubringen. Bedingt durch das Brechen der Maschinenkreismesser während des Wasserstrahlschneidens kann dieses Verfahren nicht in der Repurpose-Strategie eingesetzt werden, um aus dem Watebereich Rohlinge zu entnehmen. Da das Ziel der Repurpose-Strategie ist, möglichst viel Material in Repurpose-Produkten zu verarbeiten, wird das Laserschneiden für die Entnahme von Rohlingen verwendet. Die ansonsten gebrochenen Maschinenkreismesser müssten der Recycling-Strategie zugeführt werden, die wiederum einen hohen Energieeinsatz benötigt (Kap. 2.1.1). Neben dem ökologischen Vorteil des Laserschneidens, dass mehr Sekundärmaterial in der Repurpose-Strategie verwendet werden kann, bietet dieses Verfahren auch ökonomische Vorteile. Bei der vorliegenden Materialstärke können mittels Laserschneiden deutlich höhere Schnittgeschwindigkeiten durchgeführt werden als beim Wasserstrahlschneiden [128]. Somit wird die Effizienz der Repurpose-Strategie erhöht.

Ein Nachteil des Laserschneidens gegenüber dem Wasserstrahlschneiden ist die Wärmeeinflusszone (Kap. 2.4.4). Da das Maschinenkreismesser aus 5 mm dicken Werkzeugstahl besteht, müssen die Parameter der nächst dickeren Materialkarte für eine Materialstärke von 6 mm gewählt werden, da ansonsten die Kombination aus Laserleistung und Schnittgeschwindigkeit nicht ausreicht, um das Material über die gesamte Materialstärke aufzuschmelzen. Die Breite der Wärmeeinflusszone beträgt bei diesen verwendeten Parametern $(132 \pm 8) \mu\text{m}$ im Flanschbereich. Bedingt durch die Aufhärtung in der Wärmeeinflusszone (Abb. 44), muss diese durch Schleifen entfernt werden, da diese Zone späteres Bauteilversagen begünstigen kann [260]. Da das Schleifen ein energieintensives Fertigungsverfahren ist, ist die Reduzierung der Wärmeeinflusszone ein Ziel der Repurpose-Strategie. Das Laserschneiden ist für einheitliche Materialstärken ausgelegt, sodass lediglich die Parameter für die höchste Materialstärke verwendet werden können. Durch die abnehmende Materialstärke im Watebereich des Maschinenkreismesser nimmt die Wärmeeinflusszone zu (Kap. 4.5.2), wodurch der notwendige Materialabtrag beim nachfolgenden Schleifen erhöht wird. Die Breite der Wärmeeinflusszone beträgt bei den verwendeten Parametern und einer Materialstärke von 2 mm $(140 \pm 7) \mu\text{m}$. Da das Ziel einer Repurpose-Strategie die Wiederverwendung von Materialien mit möglichst geringem Ressourceneinsatz ist, müssen bestehende Fertigungsverfahren an die Herausforderungen einer Kreislaufwirtschaft angepasst und optimiert werden. Abschließend können folgende Punkte bei der Auswahl trennender Fertigungsverfahren in einer Repurpose-Strategie zusammengefasst werden:

- Für die Wiederverwendung von Baugruppen, Bauteilen und Materialien müssen trennende Fertigungsverfahren entsprechend der technischen Durchführbarkeit und vorhandenen Materialeigenschaften ausgewählt werden.
- Wasserstrahlabrasiv- und Laserschneiden können verwendet werden, um aus dem Flanschbereich des verschlissenen Maschinenkreismessers Repurpose-Rohlinge zu entnehmen.
- Repurpose-Rohlinge können nicht aus dem Watebereich der Maschinenkreismesser durch Wasserstrahlschneiden ausgeschnitten werden, da verfahrensbedingt eingebrachte Biegespannungen zum Brechen entlang der Spannungswalzlinien führen.
- Mittels Laserschneiden ist die Entnahme von Repurpose-Rohlingen im Watebereich möglich. Für das Ziel der Repurpose-Strategie muss dieses Verfahren an die Herausforderungen von Sekundärmaterial angepasst und optimiert werden.

5.1.3 Einfluss des Sekundärmaterials auf den Fertigungsprozess der Repurpose-Werkzeuge

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des verwendeten Sekundärmaterials auf die Fertigungsroute der Werkzeuge diskutiert. Gegenübergestellt wird die konventionelle Fertigungsroute der Pappreißmesser, der Standard-Drehseimeiße und der High-Performance-Drehseimeiße mit der Fertigungsroute der Repurpose-Werkzeuge. Hierbei müssen die Routen der Werkzeuge separat betrachtet werden, da die Verwendung des Sekundärmaterials unterschiedlichen Einfluss auf die Fertigungsprozesse hat.

Einfluss auf die Fertigungsroute des Pappreißmessers

Die Verwendung des Sekundärmaterials, also die aus einem verschlissenen Maschinenkreismesser ausgeschnittenen Repurpose-Rohlinge einer Hakenklinge, haben geringen Einfluss auf die Fertigungsroute der Pappreißmesser. In der konventionellen Fertigungsroute der Pappreißmesser werden die Rohlinge der Hakenklinge ebenfalls durch das Laserschneiden aus einer Blechtafel ausgeschnitten. Diese weist entgegen dem Maschinenkreismesser eine gleichbleibende Materialstärke auf. Da bei der konventionellen Fertigungsroute keine Wärmebehandlung durchgeführt wird, weisen die Hakenklingen-Rohlinge bereits die Oberflächenqualität der Blechtafeln auf. Somit ist kein Schleifen der Seitenflächen zum Einstellen der benötigten Oberflächenqualitäten notwendig. Es wird lediglich die Schneide der Hakenklinge durch Schleifen erstellt und geschärft. Die Repurpose-Rohlinge benötigen keine Wärmebehandlung, da die Härte des X153CrMoV12 (1.2379) ca 350 HV5 oberhalb der Härte des 75Cr1 (1.2003) liegt. Die Repurpose-Rohlinge weisen ebenfalls eine bereits geschliffene Oberfläche auf, sodass nur die Schneide durch Schleifen erstellt und geschärft werden muss. Die höhere Härte der Repurpose-Klinge ist für die

Verschleißbeständigkeit vom Vorteil, wirkt sich jedoch negativ auf den Schleifprozess aus. Der Materialabtrag beim Schleifen der konventionellen Klingen und der Repurpose-Klingen wird trotz der kleinen Differenz von 0,3 g als gleichwertig betrachtet (Tab. 30), da der Schleifprozess händisch durchgeführt wird und somit kein reproduzierbarer Prozess mit gleichbleibendem Materialabtrag vorliegt.

Für das Schleifen derselben Menge Materials des verschleißbeständigeren Stahls X153CrMoV12 (1.2379) wird mehr Energie benötigt als für den 75Cr1 (1.2003) der konventionellen Hakenklinge (Tab. 30). Des Weiteren steigt der Bedarf an Schleifscheiben an, die ebenfalls Ressourcen und Energie bei der Herstellung verbrauchen und im anfallenden Schleifschlamm verloren gehen [40, 234, 240, 242]. Durch die Entnahme der Rohlinge im Watebereich weisen die Repurpose-Hakenklingen keine einheitliche Materialstärke auf. In Abbildung 26 ist zu sehen, dass die Hakenklingen an verschiedenen Positionen auf dem Maschinenkreismesser angeordnet sind, sodass jeder Rohling andere geometrische Abmaße aufweist. Diese Unterschiede liegen sowohl im vorderen Hakenbereich, als auch im Bereich des Griffes. Um die Rohlinge auf eine einheitliche Materialstärke zu bringen, müssten diese einem weiteren Schleifprozess zugeführt und planparallel geschliffen werden. Da das Schleifen, wie bereits mehrfach erwähnt, viel Energie benötigt und der erzeugte Schleifschlamm nur unter hohem technischem Aufwand recycelt werden kann, ist das planparallele Schleifen nicht im Sinne der 10R-Strategie. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit auf das zusätzliche Schleifen verzichtet. Hier ist durch eine Marktanalyse zu überprüfen, wie die Kundenakzeptanz bei nicht standardisierten Repurpose-Produkten ist, da neben dem Umdenken der Hersteller ebenfalls die Anwender in Richtung Kreislaufwirtschaft denken müssen [261, 262].

Nach dem Schleifen der Schneide folgt die Griffmontage des Pappreißmessers (Kap. 4.2.3). Für die Montage ist bei der Fertigung der Repurpose-Pappreißmesser eine individuelle Bearbeitung des Holzgriffes notwendig, da die Materialstärke im Bereich des Griffes variiert. Hierdurch ist es nicht möglich, die Holzgriffe mit einem einheitlichen Schlitz vorzubereiten. Darüber hinaus ist eine mögliche ansteigende Materialstärke zum Ende des Griffbereiches von Nachteil, da diese Form nur mit hohem technischem Aufwand in den Holzgriff eingebracht werden kann. Wird diese jedoch nicht eingebracht, besteht beim anschließenden Vernieten des Holzgriffes die Gefahr, dass das Holz durch die auftretende Biegung aufsplittet und somit der Griff unbrauchbar ist. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Verwendung des Sekundärmaterials keinen positiven Einfluss auf die Fertigungsroute der Pappreißmesser zur Folge hat. Durch das geänderte Material und die nicht standardisierten Rohlinge erhöht sich die Komplexität der Arbeitsschritte.

Einfluss auf die Fertigungsroute des Standard-Drehselmeißels

Die Verwendung von Sekundärmaterial für die Herstellung eines Repurpose-Drehselmeißels weist gegenüber dem konventionellen Fertigungsprozess des Standard-Drehselmeißels einen hohen Einfluss auf. Die konventionellen Rohlinge für die Standard-Drehselmeißel werden ebenfalls durch Laserschneiden aus einer Blechtafel ausgeschnitten (Kap. 4.2.2). Für das Einstellen der Materialeigenschaften des 80CrV2 (1.2235) wird an den konventionellen Rohlingen eine Wärmebehandlung durchgeführt (Kap. 4.1.2). Da das nicht korrosionsbeständige Material während dieser Prozesse mit korrosiven Medien bei erhöhten Temperaturen in Kontakt kommt, weist der Rohling nach der Wärmebehandlung eine deutlich korrodierte Oberfläche auf. Neben der korrodierten Oberfläche können die konventionellen Rohlinge ebenfalls thermischen Verzug aufweisen [263]. Dieser wird vor dem Schleifprozess durch manuelles Hammerschlag-Richten reduziert. Hierbei werden wie beim Spannen der Maschinenkreismesser absichtlich Eigenspannungen in das Werkzeug eingebracht, sodass den thermisch induzierten Spannungen, die den Verzug verursachen, entgegengewirkt werden kann. Da der gesamte konventionelle Drehselmeißelrohling korrodiert ist, müssen im folgenden Schleifprozess alle Oberflächen bearbeitet werden, sodass der hohe Materialabtrag von 45 g während des Schleifens entsteht (Tab. 30). Wie bereits zuvor bei der Fertigung des Repurpose-Pappreißmessers weist der Repurpose-Rohling bereits eine geschliffene Oberflächenqualität auf. Da der Repurpose-Rohling keiner erneuten Wärmebehandlung zugeführt wird, verändert sich die bereits vorhandene Oberflächenqualität nicht. Eine Wärmebehandlung in der Repurpose-Fertigungsroute ist nicht notwendig, da der Repurpose-Werkstoff X153CrMoV12 (1.2379) (Kap. 4.1.4) ähnliche Härtewerte aufweist wie der konventionelle Werkstoff 80CrV2 (1.2235) (Kap. 4.1.2). Bei dem Schleifprozess des Repurpose-Drehselmeißels erfolgt lediglich ein Materialabtrag an der Schneide. Dieser beträgt 4,4 g was einer Reduzierung von 90,22 Prozent entspricht. Durch den Aspekt der nicht obsoleten Wärmebehandlung und des deutlich reduzierten Schleifaufwandes ergibt sich ein hoher energetischer Vorteil im Repurpose-Fertigungsprozess gegenüber der konventionellen Fertigungsroute. Berücksichtigt werden muss, dass das Repurpose-Material im vorherigen Lebenszyklus eine Wärmebehandlung durchlaufen hat und die Oberflächengüte ebenfalls durch Schleifen erreicht wurde. Ohne die Repurpose-Strategie würde das Material jedoch mit der schlechteren Recycling-Strategie verarbeitet werden, sodass erneut viel Energie für das Einschmelzen und die nachfolgenden Fertigungsprozesse benötigt würde (Kap. 2.1.1). Durch diese Betrachtung wird die zuvor benötigte Energie für das Herstellen des ersten Lebenszyklusses des Repurpose-Materials nicht berücksichtigt.

Da die Repurpose-Rohlinge aus dem bereits planparallelen Flanschbereich des Maschinenkreismessers entnommen wurden und anschließend keine zusätzliche Wärmebehandlung erfolgte, weisen die Drehselmeißel keinen thermischen Verzug auf. Hierdurch kann der manuelle Richtprozess in der Fertigungs-

route der Drechselmeißel entfallen. Nach dem Schleifen durchlaufen die Repurpose-Drechselmeißel denselben Fertigungsprozess wie die konventionellen Drechselmeißel. Lediglich das Einprägen des Firmenlogos, dass als Qualitätskriterium der Drechselmeißel gilt, ist bei den Repurpose-Drechselmeißeln nicht möglich. Die konventionellen Drechselmeißel sind über die Länge nur zu zwei Drittel gehärtet, sodass im hinteren Bereich das Firmenlogo eingebracht werden kann. Die Repurpose-Drechselmeißel bestehen aus einem vollständig gehärtetem Material, sodass das Logo über andere Verfahren aufgebracht werden muss. Diese könnten z. B. Ätzen, Lasern oder Gravieren sein. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Vorteile des Fertigungsprozesses in weniger energetischen Fertigungsschritten bestehen. Das Ausschneiden der Rohlinge durch Laserschneiden wird bei beiden Routen durchgeführt, sodass sich dieses in der Betrachtung ausgleicht. Neben den ökologischen Vorteilen der Repurpose-Fertigungsroute treten auch ökonomische Vorteile auf, da die Durchlaufzeit der Drechselmeißel aufgrund der geringeren Fertigungsschritte reduziert werden kann.

Einfluss auf die Fertigungsroute des High-Performance-Drechselmeißels

Der Einfluss auf die Fertigungsroute durch das Verwenden der Repurpose-Rohlinge für die Herstellung der Drechselmeißel ist vergleichbar mit dem Einfluss auf die Fertigungsroute des Standard-Drechselmeißels. Die Rohlinge für die konventionellen High-Performance-Drechselmeißel werden ebenfalls durch Laserschneiden aus einer Blechtafel herausgeschnitten (Kap. 4.2.2). Anschließend durchlaufen die Rohlinge auch eine Wärmebehandlung. Da für das Einstellen der Materialeigenschaften des HS6-5-2C (1.3343) höhere Temperaturen als bei dem Standard-Drechselmeißel benötigt werden (Kap. 4.1.3), wird die Wärmebehandlung nicht in Salzbadern durchgeführt. Die High-Performance-Drechselmeißel durchlaufen das Härten und dreimalige Anlassen unter Schutzgasatmosphäre in einem Ofen (Kap. 4.2.2), sodass die Oberfläche weniger stark verzundert [264]. Durch die durchgeführte Wärmebehandlung ist ebenfalls ein thermischer Verzug möglich, der im anschließenden Richtprozess reduziert wird. Da die Oberfläche weniger stark verzundert ist, reduziert sich der notwendige Materialabtrag während des Schleifens. Dieser liegt bei dem High-Performance-Drechselmeißel bei 22 g, was einer Reduzierung von 51 Prozent gegenüber dem Standard-Drechselmeißel durch die geringere Verzunderung entspricht. Trotz des geringeren Materialabtrags bei der konventionellen Fertigung der High-Performance-Drechselmeißel liegt der notwendige Materialabtrag bei dem Repurpose-Drechselmeißel mit 4,4 g deutlich darunter. Da der HS6-5-2C (1.3343) einen hohen Anteil an kritischen Legierungselementen beinhaltet (Kap. 4.1.3), ist eine Reduzierung des Schleifvolumens sinnvoll, da diese ansonsten im Schleifschlamm unnutzbar werden. Durch das Verwenden des Repurpose-Materials wird nicht das Schleifvolumen des HS6-5-2C reduziert, sondern das komplette Material eingespart. Der Energieaufwand für das Schleifen des Stahls HS6-5-2C (1.3343) und des Repurpose-Materials X153CrMoV12

(1.2379) ist mit 56,4 MJ und 56,8 MJ nahezu identisch, da die Verschleißbeständigkeit der beiden Werkstoffe ähnlich ist. Für den Schleifprozess des HS6-5-2C (1.3343) wird insgesamt 1240,80 kJ Energie verbraucht. Die benötigte Energie für das Schleifen des Repurpose-Drehseimeißels beträgt lediglich 249,92 kJ. Nach dem Schleifen durchläuft der Repurpose-Drehseimeißel dieselben Produktionsschritte wie der High-Performance-Drehseimeißel, da beide durchgängig gehärtet sind. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Verwendung des Sekundärmaterials anstelle des HS6-5-2C (1.3343) Vorteile bietet. Es können Fertigungsschritte eingespart werden, die zum Teil hoch energieintensiv sind.

Produktübergreifende Zusammenfassung des durch das Sekundärmaterial bedingten Einflusses auf die Fertigungsprozesse der Werkzeuge

- Der Einfluss auf die Fertigungsroute von Werkzeugen durch die Verwendung von Sekundärmaterial variiert je nach zu fertigendem Produkt.
- Die Verwendung von Sekundärmaterial kann die Anzahl von Fertigungsschritten reduzieren und zum Teil energieintensive Fertigungsprozesse einsparen.
- Durch die Verwendung von Sekundärmaterial kann die Menge an abzutragendem Material verringert werden, sodass weniger Schleifschlamm entsteht.
- Die Rohlinge aus Sekundärmaterial können aufgrund der nicht standardisierten Abmessungen oder geänderten Materialeigenschaften einzelne Fertigungsschritte energieintensiver und komplexer gestalten.

5.2 Herausforderungen bestehender Fertigungstechnologien zur Umsetzung einer Repurpose-Strategie

In der Literatur wird beschrieben, dass die Strategien Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture und Repurpose auf bestehender Wissens- und technologischer Basis durchgeführt werden, diese aber im Rahmen der Strategien angepasst und optimiert werden müssen [13]. Das derzeitige Wirtschaftssystem ist die Linearwirtschaft und die darin enthaltenen Fertigungsverfahren sind auf Gewinnmaximierung ausgelegt [33]. Durch fortschreitende Digitalisierung und Automatisierung ist die Effizienz der Linearwirtschaft kontinuierlich gestiegen. Automatisierte Fertigungsprozesse benötigten standardisierte Produkte bzw. Rohteile, damit diese technisch realisierbar sind [265]. In einer Kreislaufwirtschaft weisen Baugruppen, Bauteile oder Materialien keinen standardisierten Zustand auf, da diese je nach Verwendung und Anwender unterschiedlich hohen Verschleiß aufweisen. Hierdurch müssen bestehende Fertigungstechnologien für die Umsetzung einer der genannten 10R-Strategien angepasst oder opti-

miert werden. Die notwendigen Anpassungen und Optimierungen von Fertigungstechnologien für die in dieser Arbeit konzipierte Repurpose-Strategie werden im Folgenden beschrieben und diskutiert.

5.2.1 Erweiterung von Nesting-Verfahren mit Nebenbedingungen zur Steigerung der Ressourceneffizienz

In der metallverarbeitenden Industrie wird Nesting für das Erstellen von Schnittmustern in trennenden Fertigungsverfahren verwendet. In der Literatur wird das Nesting für diese Fertigungsverfahren als Schneidproblem (engl. Cutting-Problem) definiert (Kap. 2.3). Hier werden jedoch nur ein- und zweidimensionalen Schneidprobleme erwähnt [68, 76]. Diese werden darüber hinaus in Input- und Output-Maximierungsprobleme eingeteilt [76]. Bei den Input-Maximierungsverfahren soll eine bestimmte Anzahl an Geometrien in einer minimalen Fläche angeordnet werden. Demnach soll die gewünschte Bauteilmenge aus möglichst wenig Material hergestellt werden. Bei den Output-Maximierungsverfahren werden in einer vorhandenen Fläche möglichst viele der gewünschten Geometrien platziert, sodass möglichst wenig Verschnitt übrig bleibt. In einer Kreislaufwirtschaft, bei der die Verlängerung der Lebensdauer von Baugruppen, Bauteilen oder Materialien angestrebt wird, z. B. durch die Repurpose-Strategie, liegen Output-Maximierungsprobleme vor. Aus einem zur Verfügung stehenden Sekundärmaterial sollen möglichst viel in neuen Produkten wieder- bzw. weiterverwendet werden. Input-Maximierungsprobleme können bei Strategien wie Refuse, Rethink oder Reduce, bei denen eine optimierte Produktherstellung verfolgt wird [13], ebenfalls im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft eingesetzt werden.

Bei der in dieser Arbeit konzipierten Repurpose-Strategie stehen verschlissene Maschinenkreismesser als Sekundärmaterial zur Verfügung. Aus diesen sollen Rohlinge für die Herstellung von Repurpose-Werkzeugen entnommen werden. Da aus einer zur Verfügung stehenden Menge an Sekundärmaterial eine möglichst hohe Anzahl an Rohlingen entnommen werden soll, liegt ein Output-Maximierungsproblem vor. Da in einer Linearwirtschaft für die effiziente Herstellung standardisierte Ausgangsmaterialien (Blechteile mit einheitlicher Materialstärke) verwendet werden müssen, gibt es derzeit nur Nesting-Verfahren für Schneidprobleme, die Geometrien auf einer zweidimensionalen Fläche anordnen (Kap. 2.3.2). Das verschlissene Maschinenkreismesser weist jedoch keine einheitliche Materialstärke auf (Kap. 4.2.1). Hierdurch muss das dreidimensionale Volumen des Sekundärmaterials bei der Anordnung der Rohlinge berücksichtigt werden. Die zu platzierenden Geometrien der Drechselmeißel können nur im Flanschbereich des verschlissenen Maschinenkreismessers platziert werden, da die Materialstärke im Watebereich nicht ausreicht. Bei den derzeit zur Verfügung stehenden Nesting-Verfahren für Schnittprobleme wird das dreidimensionale Volumen nicht berücksichtigt. Dreidimensionale Volumen werden derzeit beim Nesting nur für die Lösung von Packproblemen angewendet (Kap. 2.3.3).

In der metallverarbeitenden Industrie müssen für die Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien dreidimensionale Schneidprobleme für den industriellen Einsatz entwickelt werden.

Neben der Weiter- und Wiederverwendung von Materialien, welches das übergeordnete Ziel der Repurpose-Strategie ist, soll der dafür notwendige Ressourceneinsatz minimiert werden [32]. Um die benötigte Energie bei der Herstellung der Repurpose-Produkte zu minimieren, müssen die Nesting-Verfahren Nebenbedingungen berücksichtigen. Diese zu berücksichtigenden Nebenbedingungen zielen auf die nachfolgenden Fertigungsprozesse zur Herstellung der Repurpose-Werkzeuge ab. Die Entnahmeposition der Repurpose-Rohlinge in dem zur Verfügung stehenden Sekundärmaterial hat entscheidenden Einfluss auf die nachfolgenden Fertigungsprozesse, sodass diese im Rahmen der Repurpose-Strategie unter dem Aspekt der Energieminimierung berücksichtigt werden muss.

In Abbildung 26 sind zwei verschiedene Schnittmuster dargestellt. In beiden Varianten werden in dem Watebereich 24 Hakenklingen-Rohlinge und in dem Flanschbereich vier Drechselmeißel-Rohlinge angeordnet. Nach den in der Literatur beschriebenen Output-Maximierungsprinzip Verfahren wären beide Schnittmuster gleichwertig, da insgesamt 28 Repurpose-Rohlinge aus einem verschlissenen Maschinenkreismesser entnommen wurden. Unter Berücksichtigung des nachfolgenden Produktionsprozesses, bei dem die Repurpose-Produkte auf dieselbe planparallele Kontur wie die konventionellen Werkzeuge geschliffen werden müssten, ist die Betrachtung der beiden Varianten unterschiedlich (Kap. 4.10.1). Beim ersten Schnittmuster in Abbildung 26a sind die Rohlinge der Hakenklinge eher im Flanschbereich angeordnet. Durch die dickere Materialstärke in diesem Bereich verringert sich das Gewicht des nach dem Ausschneiden übrig gebliebenen Verschnitts (Tab. 13). Bei der zweiten Variante sind die Rohlinge der Hakenklinge eher am äußeren Durchmesser des verschlissenen Maschinenkreismessers angeordnet (Abb. 26b). Da die Materialstärke in diesem Bereich geringer ist, wiegt der Verschnitt mehr als bei der ersten Variante aus Abbildung 26a (Tab. 14). Ein höheres Gewicht des Verschnitts bedeutet, dass für die Recycling-Strategie, in der der Verschnitt verarbeitet wird, mehr Energie eingesetzt werden muss. Durch Einbeziehen des Schleifens mit in die Bewertung ist zu sehen, dass sich die zu schleifende Masse entgegen dem Gewicht vom Verschnitt verhält. Bei der zweiten Anordnung in Abbildung 26b muss weniger Material weggeschliffen werden (Tab. 13 und 14). Des Weiteren wirkt sich die höhere Menge an zu schleifendem Material negativ in der Berechnung aus, da die Schleifspäne nicht in die Recycling-Strategie einfließen und somit das verlorene Material erneut hergestellt werden muss (Kap. 4.10.1). Die nach Formel 3.6 berechneten Energiewerte für die beiden dargestellten Schnittmuster zeigen, dass das zweite Schnittmuster 41,73 Prozent weniger Energie für das Recycling, Schleifen und Wiederherstellen von abgetragenen Material benötigt (Kap. 4.10.1). Bei dieser aufgestellten Berechnung ist zu berücksichtigen, dass hierfür die Repurpose-Produkte wie eingangs erwähnt auf dieselbe Materialstärke wie die konventionellen geschliffen werden. Die für das Schleifen benötigte Energie und der Materialverlust unterstützen nicht die Ziele der Repurpose-Strategie und sollten daher vermieden

bzw. reduziert werden. Das Schleifen kann jedoch nicht komplett vernachlässigt werden, da die Anwender der Werkzeuge einheitliche Produkte wünschen. Hier müsste ebenfalls ein Umdenken bei den Konsumenten stattfinden, dass Repurpose-Produkte keine einheitlichen Abmaße aufweisen könnten [261, 262].

Das Schleifvolumen in nachfolgenden Fertigungsschritten kann darüber hinaus über zusätzliche Einschränkungen für das Nesting-Verfahren reduziert werden. Diese Einschränkungen der möglichen Position im Sekundärmaterial können Qualitätskriterien oder fertigungstechnische Vorgaben der Repurpose-Rohlinge bzw. -Produkte sein. Ein Kriterium könnten Toleranzen bei der Materialstärke sein, die die hergestellten Werkzeuge aufweisen dürfen. Diese definierte Toleranz kann die Funktionalität des Repurpose-Produktes gewährleisten. Eine Toleranz bei der Materialstärke kann aber auch bei der Weiterverarbeitung entscheidend sein, da zu dicke Repurpose-Rohlinge eventuell nicht in den bestehenden Fertigungsprozess - Aufnahmen der Schleifmaschinen - integriert werden können.

Neben der für nachfolgende Fertigungsprozesse benötigten Energie und Funktionalität der Repurpose-Werkzeuge müssen weitere Nebenbedingungen mit in das Nesting-Verfahren einbezogen werden. In bestehenden Nesting-Verfahren wird die Walzrichtung des verwendeten Materials bereits berücksichtigt [87, 88]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die Materialeigenschaften des Sekundärmaterials von der Karbidzeiligkeit abhängig sind (Kap. 4.1.4). Diese veränderten Materialeigenschaften in Abhängigkeit der Karbidzeiligkeit weisen ebenfalls Einfluss auf die Standzeit der Repurpose-Werkzeuge auf (Kap. 4.7). Die Schneiden der Hakenklinge und der Drechselmeißel sind in beiden Schnittmustern in Abhängigkeit der Karbidzeiligkeit und dem daraus resultierenden Einfluss auf die Standzeit angeordnet (Abb. 26).

Entgegen den standardisierten Blechtafeln in einer Linearwirtschaft können Bereiche im Sekundärmaterial vorliegen, die für die Repurpose-Strategie nicht berücksichtigt werden können. Diese Bereiche müssen während des Nestings zur Platzierung von Geometrien ausgeschlossen werden. In der Lederindustrie wird dieses Vorgehen verwendet, um Fehlstellen wie z. B. Mückenstiche auszuschließen [89]. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Maschinenkreismessern können die enthaltenen Bohrungen (Abb. 25) als Fehlstellen definiert werden. Das Nesting-Verfahren muss sowohl die im verschlissenen Maschinenkreismesser enthaltene Zentralbohrung als auch die kleineren Bohrungen im Flanschbereich berücksichtigen. Diese bereits angewendeten Nebenbedingungen in Nesting-Verfahren können für das Erreichen der Repurpose-Strategie Ziele angepasst werden. Kleinere Fehlstellen könnten z. B. nicht beim Positionieren der Rohlinge ausgeschlossen werden, da diese die Funktion des Repurpose-Produktes nicht beeinflussen. Die Rohlinge der Hakenklingen könnten zum Beispiel mit dem Griffbereich über einer kleineren im Maschinenkreismesser enthaltenen Bohrung platziert werden. Beim Einbeziehen der Fehlstellen im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft ist erneut die Akzeptanz für keine perfekten Produkte beim Konsumenten notwendig. Zusammenfassend können folgende Aussagen zur

Erweiterung von Nesting-Verfahren in einer Repurpose-Strategie getätigt werden:

- Nesting-Verfahren können wie in der Linearwirtschaft auch in einer Kreislaufwirtschaft eingesetzt werden, um Fertigungsprozesse effizient zu gestalten.
- Hierzu müssen dreidimensionale Schnittprobleme aufgrund des nicht einheitlichen Sekundärmaterials entwickelt werden.
- Richtungsabhängige Materialeigenschaften und vorhandene Fehlstellen im Sekundärmaterial müssen bei der Anordnung berücksichtigt werden.
- Der Einfluss der Anordnung auf die ökologische Betrachtung der nachfolgenden Fertigungsprozesse muss als Nebenbedingung in das Nesting-Verfahren einfließen.
- Durch die Anzahl der vielen Eingangsvariablen und Nebenbedingungen wird eine hohe Rechenleistung für das Nesting benötigt.

5.2.2 Möglichkeit der In-situ Lasersteuerung zur Effizienzsteigerung während des Laserschneidprozesses

Die aktuellen Produktionsprozesse und Fertigungsverfahren sind, wie bereits mehrfach erwähnt, auf eine Linearwirtschaft ausgerichtet, deren Ziel die Gewinnmaximierung ist. In aktuellen Laserschneidprozessen werden Blechtafeln mit einheitlicher Materialstärke in Laserschneidanlagen verarbeitet (Kap. 2.4.4). Für die Verarbeitung von Blechen mit einheitlicher Materialstärke sind die Laserschneidanlagen von Herstellern entwickelt worden. Die Laserschneidanlagen unterscheiden sich nach zu schneidendem Werkstoff und der höchsten zu schneidenden Materialstärke [266]. Hierbei ist die zur Verfügung stehende Laserleistung entscheidend. Je dicker die zu schneidende Materialstärke ist, desto höher muss die Laserleistung der Laserschneidanlage sein. Bei der Entwicklung der Laserschneidanlagen werden die Prozessparameter für Materialien und deren Materialstärke erforscht und für den Anwender als sogenannte Materialkarte abgespeichert. Bei der Arbeitsvorbereitung für das Laserschneiden wird für jede Blechtafel das Schnittmuster erstellt und die entsprechende Materialkarte ausgewählt (Kap. 3.3.2). Somit sind unter anderem die Parameter der Laserleistung und der Schnittgeschwindigkeit des Laserschneidprozesses in Abhängigkeit des Materials und der Materialstärke festgelegt. In Tabelle 2 sind die Unterschiede der vom Anlagenhersteller definierten Prozessparameter für die CO₂-Laserschneidanlage TLF 3800 turbo der Firma Trumpf zu sehen. Bis zu einer Materialstärke von 6 mm nimmt die Laserleistung bis zu der maximal verfügbaren Leistung von 3800 W zu. Die Schnittgeschwindigkeit wird hierbei jedoch um die Hälfte von 3000 mm min⁻¹ auf 1500 mm min⁻¹ reduziert. Bei den Parametern für die Materialstärken 8 mm und 10 mm verringert sich die Schnittgeschwindigkeit weiter. Hierdurch kann die Energie des Lasers länger an einer Stelle vom Material absorbiert werden, sodass das Ma-

terial über die gesamte Dicke aufschmilzt. Um das aufgeschmolzene Material durch den Schnittspalt ausblasen zu können, nimmt mit steigender Materialstärke ebenfalls der Gasdruck zu (Tab. 2).

Das Einstellen unterschiedlicher Materialstärken während der Bearbeitung einer Blechtafel bzw. eines Schnittmusters ist bei den derzeitig zur Verfügung stehenden Laserschneidanlagen nicht möglich. Zwar wird in der Literatur das dreidimensionale Laserschneiden erwähnt, dabei handelt es sich aber um das Bearbeiten von dreidimensionalen Bauteilen [267]. Beim dreidimensionalen Laserschneiden werden z. B. aus tiefgezogenen Blechbauteilen Aussparungen herausgeschnitten. Diese Bauteile weisen jedoch neben der dreidimensionalen Form eine gleichbleibende Materialstärke auf. Das Sekundärmaterial im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft kann jedoch von den für die Linearwirtschaft produzierten Blechtafeln abweichen. Bei der in dieser Arbeit konzipierten Repurpose-Strategie weist das Sekundärmaterial keine einheitliche Materialstärke auf (Kap. 4.2.1). Die verschlissenen Maschinenkreismesser haben im Flanschbereich eine Materialstärke von 5 mm, die über den Watebereich auf nahezu 0 mm an der Schneide abnimmt.

Für das Ausschneiden der Repurpose-Rohlinge aus dem verschlissenen Maschinenkreismesser mussten die Parameter für eine Materialstärke von 6 mm gewählt werden. Hierbei lag die Laserleistung bei 3800 W und die Schnittgeschwindigkeit bei 1500 mm min^{-1} . Beim Ausschneiden von Repurpose-Rohlingen im Flanschbereich wird demnach auch mit den Parametern für 6 mm Materialstärke geschnitten. Neben der Laserleistung, der Schnittgeschwindigkeit und dem Gasdruck variiert je nach Materialstärke der Düsenabstand. Das Einstellen des Düsenabstands wird vollautomatisch im Laserschneidprozess über entsprechende Sensorik durchgeführt. Im Gegensatz zu dem kalten Schnitt beim Wasserstrahlschneiden (Kap. 2.4.3) bildet sich während des Laserschneidens eine Wärmeeinflusszone aus (Kap. 4.5.2). Die sich ausbildende Wärmeeinflusszone weist den in Kapitel 5.1.2 beschriebenen negativen Einfluss auf die Repurpose-Werkzeuge auf, sodass diese weggeschliffen werden muss.

Die Breite der Wärmeeinflusszone an den im Flanschbereich ausgeschnittenen Repurpose-Rohlingen beträgt $(132 \pm 8) \mu\text{m}$. Da die Prozessparameter sowohl im Flansch- als auch im Watebereich dieselben sind, steigt die Breite der Wärmeeinflusszone mit geringer Materialstärke im Flanschbereich an. Dies liegt an der höheren Laserleistung und der geringeren Schnittgeschwindigkeit, die für eine geringere Materialstärke notwendig wäre. Die Breite der Wärmeeinflusszone steigt auf $(140 \pm 7) \mu\text{m}$ bei einer Materialstärke von 2 mm an. Bei den Prozessparametern für 10 mm Materialstärke würde die Breite der Wärmeeinflusszone auf $(171 \pm 6) \mu\text{m}$ ansteigen. Neben dem Ziel der Wiederverwendung von Material in der Repurpose-Strategie soll die dafür aufgewendete Energie minimiert werden [32]. Die steigende Breite der Wärmeeinflusszone, bedingt durch den zu hohen Energieeintrag bei dünneren Materialstärken, wirkt sich negativ auf das Ziel der Repurpose-Strategie aus. Neben dem erhöhten Schleifvolumen nimmt der Aufwand innerhalb der Repurpose-Strategie zu. Bei Repurpose-Produkten, die geringe Toleranzen bei der Maßhaltigkeit einhalten müssen, muss die sich ausbildende Wärme-

einflusszone als Aufmaß vor dem Laserschneiden bei der Erstellung der Schnittmuster berücksichtigt werden. Durch das Hinzufügen des benötigten Aufmaßes kann sich die Anzahl der Repurpose-Rohlinge im Schnittmuster reduzieren, da diese beim Anordnen überlappen können. Dies würde sich ebenfalls negativ auf die Ziele der Repurpose-Strategie auswirken.

Die Repurpose-Strategie gehört in die zweite Gruppe der 10R-Strategien, die auf bekannter Wissens- und Technologiebasis beruhen und für die Anwendung in der Repurpose-Strategie weiterentwickelt werden müssen (Kap. 2.1.1). Die derzeitigen Technologien sind, wie bereits in dem vorherigen Kapitel 5.2.1 beschrieben, für eine Linearwirtschaft ausgelegt. Das Laserschneiden bietet in der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie die Möglichkeit, aus zur Verfügung stehendem Sekundärmaterial Rohlinge für Repurpose-Werkzeuge aus gehärtetem Werkzeugstahl auszuschneiden (Kap. 4.5). Hierdurch wird nach der 10-Strategie auf eine bekannte Technologie zurückgegriffen [13]. Um das Ziel der 10R-Strategien zu erfüllen, dass möglichst wenig Energie für die Wiederwendung von Material eingesetzt wird, ist eine Anpassung und Optimierung des Laserschneidens notwendig. Da die zu schneidenden Sekundärmaterialien keine einheitliche Materialstärke aufweisen, ist eine In-situ-Steuerung des Laserschneidprozesses in Abhängigkeit der Materialstärke notwendig. Im Falle der in dieser Arbeit konzipierten Repurpose-Strategie muss die Laserleistung in Abhängigkeit der reduzierten Materialstärke im Wertebereich angepasst werden.

Durch die Möglichkeit der kontinuierlichen Anpassung der Parameter verringert sich die vom Werkzeugstahl absorbierte Energie, was eine Reduzierung der Wärmeeinflusszone zur Folge hat. In den Abbildungen 38 und 39 sind die Wärmeeinflusszonen von Repurpose-Rohlingen mit einer zur Materialstärke angepassten Laserleistung dargestellt. Die Breite der Wärmeeinflusszone bei einer Materialstärke von 2 mm verringert sich von $(140 \pm 7) \mu\text{m}$ auf $(79 \pm 8) \mu\text{m}$, was einer Reduzierung von 42 Prozent entspricht. Eine Reduzierung von 33 Prozent konnte bei einer Materialstärke von 4 mm und den dafür vorgesehenen Prozessparameter nachgewiesen werden. Die Wärmeeinflusszone verringerte sich von $(133 \pm 9) \mu\text{m}$ auf $(91 \pm 6) \mu\text{m}$. Da nicht die Möglichkeit bestand, die benötigte Materialkarte auf eine Materialstärke von 3 mm und 5 mm einzustellen, kann die genaue Reduzierung der Wärmeeinflusszone nicht ermittelt werden. Gegenüber den Prozessparametern für eine Materialstärke von 6 mm konnte jedoch bei der Materialstärke von 3 mm gezeigt werden, dass sich die Wärmeeinflusszone um 27 Prozent reduziert, wenn die Prozessparameter für 4 mm Materialstärke ausgewählt werden (Abb. 39).

Die Versuche zeigen, dass die kontinuierliche Anpassung der Prozessparameter in Abhängigkeit der Materialstärke das Ziel der Repurpose-Strategie verbessern. Die Breite der Wärmeeinflusszone kann hierdurch signifikant reduziert werden, sodass bei dem nachfolgenden Fertigungsschritt weniger Material durch das Schleifen abgetragen werden muss (Kap. 4.5.2). In Tabelle 29 sind Parameter des

Laserschneidprozesses und der resultierenden Wärmeeinflusszone mit dem nachfolgenden Schleifen der verschiedenen Materialkarten zusammengefasst. Bei der herkömmlichen Einstellung für eine Materialstärke von 6 mm ist zu sehen, dass das zu schleifende Volumen ca. 1,3 g beträgt. Hierfür wird eine Energie von 67,95 kJ benötigt. Bei den für die Repurpose-Strategie optimierten Prozessparametern beträgt die zu schleifende Wärmeeinflusszone lediglich ca. 0,8 g wofür 42,66 kJ Energie benötigt wird. Das entspricht einer Reduzierung von 38 Prozent. Gegenüber den Prozessparametern für eine Materialstärke von 10 mm beläuft sich die Reduzierung durch die optimierten Parameter auf über 50 Prozent. Das verringerte Schleifvolumen der reduzierten Wärmeeinflusszone wirkt mit 0,4 g verhältnismäßig gering, verdeutlicht aber das Potenzial, Fertigungsprozesse ressourceneffizienter zu gestalten, sodass die Ziele der Repurpose-Strategie erreicht werden können. Des Weiteren wurde bereits mehrfach erwähnt, dass eine Reduzierung von Schleifschlamm bzw. Schleifspänen anzustreben ist, da diese nur durch hohen Aufwand recycelt werden können (Kap. 5.1). Darüber hinaus summiert sich das pro Repurpose-Bauteil geringere Schleifvolumen über die mögliche Stückzahl auf.

Neben der eingesparten Energie in nachfolgenden Fertigungsprozessen durch die reduzierte Wärmeeinflusszone wird der Prozess des Laserschneidens ebenfalls ökologischer aber auch ökonomischer. Bedingt durch die kontinuierliche Laserleistungsanpassung in Abhängigkeit der Materialstärke wird für das Laserschneiden lediglich soviel Energie verbraucht, wie für das Aufschmelzen tatsächlich benötigt wird. Der Umfang bzw. die Schnittlänge eines Rohlings beträgt 400 mm. Für das Ausschneiden reduziert sich die verbrauchte Energie des Lasers von 31,88 kWh auf 19,39 kWh. Ein weiterer Vorteil der Optimierung ist die verringerte Prozesszeit, die für das Ausschneiden einer Hakenklinge benötigt wird. Bedingt durch die höheren Schnittgeschwindigkeiten bei geringeren Materialstärken reduziert sich die Bearbeitungszeit für eine Hakenklinge um 25 Prozent auf 22,4 Sekunden (Tab. 29). Die Reduzierung der benötigten Zeit für das Ausschneiden erhöht die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit der Repurpose-Strategie, da eine höhere Stückzahl produziert werden kann.

Für die technische Umsetzung der kontinuierlichen Anpassung der Prozessparameter können verschiedene Möglichkeiten angewendet oder kombiniert werden. Für das in Kapitel 5.2.1 betrachtete dreidimensionalen Schneidproblem in Nesting-Verfahren zur Erstellung von Schnittmustern im Rahmen der Repurpose-Strategie wird das geometrische Volumen des Sekundärmaterials ebenfalls benötigt. Anstelle des zweidimensionalen Schnittmusters können die dreidimensionalen Daten des Nestings ebenfalls an die Laserschneidanlage zur Pfadprogrammierung übergeben werden. Hierdurch können die Prozessparameter für das entsprechende Schnittmuster in Abhängigkeit der Materialstärke angepasst werden. Der Arbeitsaufwand für das Nesting des dreidimensionalen Schneidproblems kann somit in zwei nachfolgenden Produktionsschritten einen ökologischen und ökonomischen Vorteilen bieten. Diese Produktionsschritte sind der Laserschneidprozesses und der nachfolgende Schleifprozess. Neben den dreidimensionalen Daten kann die vorhandene Sensorik, die zum Einstellen des benötigten Düsenab-

stand bereits in Laserschneidanlagen verbaut ist, dazu verwendet werden, die aktuelle Materialstärke zu berechnen. Durch das Korrigieren des Düsenabstands verfährt die z-Achse, an der der Laserschneidkopf befestigt ist, nach unten, sobald die Materialstärke des verschlissenen Maschinenkreismessers im Watebereich abnimmt. Über den zurückgelegten Weg des Laserschneidkopfes in Z-Richtung kann die vorliegende Materialstärke berechnet werden. Hierzu muss der Wert von der ursprünglichen Materialstärke subtrahiert werden. Im Falle des vorliegenden verschlissenen Maschinenkreismessers ergibt sich das Problem bei diesem Vorgehen, dass die Materialstärke auf der Ober- und Unterseite abnimmt. Die Materialstärke muss somit nach Formel 5.1 berechnet werden.

$$\text{Aktuelle Materialstärke} = \text{Ausgangs Materialstärke} - (2 \cdot \text{Düsenabstand in Z-Richtung}) \quad (5.1)$$

Ausgehend von der Ausgangsmaterialstärke wird der korrigierte Düsenabstand in Z-Richtung zweimal subtrahiert, sodass die vorliegende Materialstärke berechnet ist. In Abbildung 114 ist dieses Vorgehen schematisch dargestellt. Abbildung 114a zeigt den derzeitigen Stand der Technik. Der Düsenabstand wird während des Laserschneidprozesses korrigiert, die Laserleistung und die Schnittgeschwindigkeit bleiben jedoch auf dem definierten Wert für die höchste Materialstärke. Das in Abhängigkeit der vorliegenden Materialstärke optimierte Laserschneiden ist in Abbildung 114b dargestellt. Hierbei wird die Laserleistung und die Schnittgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Materialstärke angepasst. Eine weitere Möglichkeit wäre, dass Laserschneidanlagen mit zusätzlicher Sensorik ausgestattet werden. Hierdurch können Materialstärken und die Position des Laserschneidkopfes erfasst werden, sodass die Prozessparameter kontinuierlich angepasst werden. Folgende Aussagen können über die Möglichkeit der In-situ-Lasersteuerung in Abhängigkeit der Materialstärke zusammengefasst werden:

- Aktuelle Laserschneidanlagen und -prozesse sind auf einheitliche Materialstärken ausgelegt, so dass lediglich eine Materialkarte mit entsprechenden Prozessparameter ausgewählt werden kann.
- Da Sekundärmaterial in einer Repurpose-Strategie keine einheitliche Materialstärke aufweisen kann, wird teilweise zu viel Energie bei geringen Materialstärken verbraucht.
- Durch den erhöhten Wärmeeintrag bei geringen Materialstärken wird die Wärmeeinflusszone vergrößert, sodass mehr Material weggeschliffen werden muss.
- An die Materialstärke angepasste Prozessparameter während des Laserschneidens können die Breite der Wärmeeinflusszone um bis zu 50 Prozent verringern.
- Die Wirtschaftlichkeit des Laserschneidprozesses wird durch höhere Schnittgeschwindigkeiten bei geringerer Materialstärke erhöht, da die Zeit zum Ausschneiden um bis zu 63 Prozent reduziert wird.

- Für die kontinuierliche Anpassung der Prozessparameter während des Laserschneidens können die zuvor verwendeten dreidimensionalen Daten des Nesting-Verfahrens verwendet werden.

5.3 Einfluss der Repurpose-Strategie auf den Lebenszyklus von Werkzeugen bei Raumtemperatur

In Repurpose-Strategien sind Materialwechsel bei der Herstellung von Produkten nahezu unerlässlich. Zur Verfügung stehendes Sekundärmaterial wird in konventionelle Fertigungsprozesse integriert und Produkte mit geänderter Funktion gefertigt [13]. Wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, werden in einer Linearwirtschaft die Materialanforderungen bei der Produktentwicklung definiert und anschließend passende Materialien verarbeitet. Im Rahmen der Repurpose-Strategie können die Materialeigenschaften von den eigentlichen Materialanforderungen abweichen (Kap. 5.1.1). Da erneute Wärmebehandlungen im Sinne der 10R-Strategien vermieden werden sollen, muss der Einfluss des Materialwechsels auf die Funktionalität der Repurpose-Produkte analysiert und diskutiert werden. Im Folgenden wird auf den Einfluss der Gebrauchseigenschaften der Repurpose-Produkte, wie das Sekundärmaterial die Verschleißbeständigkeit der Werkzeuge verändert und wie sich die Standzeit auf die Umweltleistung auswirkt, diskutiert.

5.3.1 Einfluss des Sekundärmaterials auf die Gebrauchseigenschaften der Hakenklingen

Die in Kapitel 4.6.2 hergestellten Repurpose-Pappreißmesser sind in anwendungsnahen Verschleißversuchen neben den konventionellen Pappreißmesser getestet worden. Analysiert werden sollte der Einfluss auf die Funktionalität und die Gebrauchseigenschaften durch das Verwenden des Sekundärmaterials zur Herstellung der Repurpose-Pappreißmesser. In dem dafür konstruierten Versuchsstand sind die Hakenklingen der konventionellen und Repurpose-Pappreißmesser eingespannt worden (Kap. 3.8.3). An jeder analysierten Klinge erfolgten 50 Schnittzyklen mit einer definierten Schnittlänge von 210 mm durch eine Bitumenbahn, sodass insgesamt 10,5 m Schnittlänge vorlag. Bei jedem durchgeführten Zyklus ist die benötigte Schnittkraft über die Schnittlänge aufgenommen worden.

In Abbildung 101 sind die aufgezeichneten Schnittkräfte über die Schnittlänge nach dem ersten Schnittzyklus zu sehen. Die benötigte Schnittkraft der konventionellen Hakenklinge liegt im Bereich von 160 N und somit unter der benötigten Schnittkraft der Repurpose-Produkte. Durch die Verwendung des Sekundärmaterials weisen die Repurpose-Hakenklingen nicht die planparallele Geometrie der konventionellen Hakenklingen auf, da das planparallele Schleifen zur Vermeidung von Schleifschlamm nicht durchgeführt wurde (Kap. 5.1.3). In Abbildung 115 sind die geometrischen Unterschiede der Hakenklinge schematisch dargestellt. Die Schneidfähigkeit beschreibt die Fähigkeit einer Schneide, das

Schnittgut zu durchtrennen [268]. Je höher die Schneidfähigkeit einer Schneide ist, desto geringer ist die aufzubringende Schnittkraft. Die Schneidfähigkeit einer Schneide wird durch den Schneidenwinkel β beeinflusst. Die Schneidenwinkel der verwendeten Hakenklingen weisen nahezu identische Werte auf (Tab. 25). Ein weiterer Einflussfaktor für die Schneidfähigkeit ist die Schärfe b und die Schneidendicke d der Schneide (Abb. 116). Die Kantenverrundung im Ausgangszustand der konventionellen Hakenklinge ist höher als bei den Repurpose-Produkten, demnach ist die Ausgangsschärfe geringer. Aus der Literatur ist bekannt, dass Schneiden aus 75Cr1 (1.2003) eine höhere Ausgangsschärfe und kleinere Schneidenwinkel als solche aus X153CrMoV12 (1.2379) erreichen können [248], was entgegen der ermittelten Werte aus Tabelle 25 ist. Demgegenüber steht die deutlich höhere Schneidenbreite der Repurpose-Hakenklingen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Schneidenbreite in den vorliegenden Versuchen entscheidenden Einfluss auf die benötigte Schnittkraft hat. Diese liegt trotz desselben Schneidenwinkels und einer höherer Ausgangsschärfe bei den Repurpose-Hakenklingen mit breiter Schneide oberhalb der konventionellen Hakenklingen. Bei dem durchgeführten Verschleißversuch handelt es sich um einen Zug- und Druckschnitt. Obwohl die Hakenklinge in der Traverse der Universalprüfmaschine lediglich nach unten verfährt (Druckschnitt), greift eine Schneidenlänge von 20 mm in der angewinkelten Bitumenbahn an. Hierdurch ergibt sich der kombinierte Zug- und Druckschnitt. Der Werkstoff 75Cr1 (1.2003) wird vorwiegend für Druckschnitt beanspruchte Klingen verwendet, da durch das nahezu karbidfreie Gefüge Schneidenwinkel zwischen 16° und 25° geschliffen werden können [248]. Schneiden, die für Zugschnitte verwendet werden, sind aus dem Werkstoff X153CrMoV12 (1.2379) hergestellt. Hier liegt der Schneidenwinkel β zwischen 40° und 60° . Aufgrund der großen Cr-reichen M_7C_3 Karbide im X153CrMoV12 (1.2379) (Kap. 2.2.1) können Schneiden aus diesem Werkstoff nicht feiner geschliffen werden. Durch die enthaltenen Karbide bildet sich eine schartige Schneide aus. Die Schartigkeit der Schneide ist zu sehen, wenn die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen in den Abbildungen 98 bis 100 der Schneiden im Ausgangszustand betrachtet werden. Die Schneide des konventionellen Pappreißmesser weist in der Seitenansicht eine glattere Schneide auf (Abb. 98e) als die Repurpose-Hakenklinge in Abbildung 100e. Neben der Höhe der benötigten Schnittkraft ist zu sehen, dass die Schnittkraft bei der konventionellen Hakenklinge über die Schnittlänge beim ersten Zyklus nahezu konstant bleibt (Abb. 98). Die Schnittkräfte der Repurpose-Hakenklingen weisen hingegen einen abfallenden Verlauf über die Schnittlänge auf. Das ist auf den in Abbildung 115 dargestellten geometrischen Unterschied der Hakenklinge zurückzuführen. Durch die Materialstärke der konventionellen Hakenklinge ist die Schneidenbreite über die gesamte Klinge einheitlich, sodass die benötigte Schnittkraft konstant bleibt. Bei den Repurpose-Hakenklingen hingegen ist eine abnehmende Materialstärke zu sehen. Hierdurch reduziert sich ebenfalls die Schneidenbreite über die Schnittlänge, worauf die Reduzierung der benötigten Schnittkraft zurückzuführen ist.

Die nach dem fünfzigsten Schnittzyklus gemessenen Schnittkräfte sind in Abbildung 102 über die

Schnittlänge aufgetragen. Die aufgezeichneten Schnittkräfte der konventionellen Hakenklinge liegen signifikant höher als beim ersten Schnittzyklus und auf einem vergleichbaren Niveau wie die Repurpose-Hakenklingen nach dem fünfzigsten Schnittzyklus (Abb. 102). Des Weiteren weisen nach dem fünfzigsten Schnittzyklus alle Kräfteverläufe eine Abnahme über die Schnittlänge auf. Die Schnittkräfte der Repurpose-Hakenklingen sind lediglich um max. 10 N erhöht (Abb. 99), wohingegen die Schnittkraft der konventionellen Hakenklinge um 55 N angestiegen ist. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die maximal gemessene Kraft des fünfzigsten Zyklus miteinander verglichen wurde. Da die verwendete Bitumenbahn kein standardisiertes Schnittgut ist (Kap. 3.8.3), können durch Inhomogenitäten der Bitumenbahn die maximalen Schnittkräfte beeinflusst und somit der Vergleich der Zyklen verzerrt werden. Diese Inhomogenität ist die Verteilung und Anzahl der Schiefersplitter (Abb. 19) oder aber auch das Bitumen selber, welches durch Umwelteinflüsse partiell andere Festigkeiten aufweisen kann. Unter Berücksichtigung der gemittelten Schnittkraft zwischen einer Schnittlänge von 50 mm und 200 mm aus Tabelle 23 lässt sich dennoch die Aussage treffen, dass die benötigte Schnittkraft bei der konventionellen Hakenklinge schneller ansteigt. In Abbildung 97 ist exemplarisch eine Hakenklinge nach dem fünfzigsten Schnittzyklus zu sehen. Erkennbar ist, dass im Bereich der angreifenden Schneide Bitumen und einzelne Schiefersplitter haften. Die gereinigte Schneide ist anschließend unter dem Rasterelektronenmikroskop betrachtet worden. Bei der konventionellen Hakenklinge sind eine deutlich höhere Kantenverrundung und signifikante Verschleißspuren zu sehen (Abb. 98). Auf die Verschleißspuren und die Verschleißbeständigkeit wird im folgenden Kapitel 5.3.2 eingegangen. Die Kantenverrundung der Schneide stieg von 31 μm auf 318 μm an. Die Verschleißspuren und die Kantenverrundung der Repurpose-Produkte sind hingegen nicht signifikant ausgeprägt. Der unterschiedlich hohe Anstieg der Kantenverrundung ist ebenfalls im Masseverlust der Hakenklingen zu beobachten (Tab. 24). Der durch Verschleiß erzeugte Masseverlust ist nachteilig für eine mögliche 10R-Strategie, da der daraus resultierende Materialverlust in keiner Strategie wiederverwendet werden kann [40]. Dieser sollte demnach für die Ziele der 10R-Strategien minimiert werden.

Durch die steigende Kantenverrundung nimmt die Schärfe und demnach die Schneidfähigkeit ab, sodass die benötigte Schnittkraft steigt [269]. Somit korrelieren die Ergebnisse der aufgezeichneten Schnittkraft mit denen der Kantenverrundung. Die steigende Kantenverrundung ist jedoch nicht ausschließlich für den Anstieg der Schnittkraft verantwortlich. Das anhaftende Bitumen an der Seitenfläche der Hakenklinge erhöht die Reibung zwischen der Klinge und der zu schneidenden Bitumenbahn während des Schnitts, was ebenfalls für eine Erhöhung der Schnittkraft sorgt. Bei diesem Einfluss wird davon ausgegangen, dass diese Erhöhung der Schnittkraft pro Zyklus denselben Einfluss hat und nicht über die Anzahl der Zyklen aufsummiert wird, wie der fortschreitende Verschleiß durch die Kantenverrundung. Die ebenfalls abnehmende Schnittkraft nach dem fünfzigsten Schnittzyklus der konventionellen Hakenklinge ist auf die Seitenfläche der Hakenklinge zurückzuführen (Abb. 97). Diese

nimmt mit fortschreitendem Schnitt in Richtung der Hake ab, sodass die Reibfläche reduziert wird. Daraus resultiert ebenfalls eine abnehmende Schnittkraft über die Schnittlänge. Zusammenfassend können folgende Punkte über den Einfluss des Sekundärmaterials auf die Gebrauchseigenschaften der Hakenklinge zusammengefasst werden:

- Die geänderte Schneidengeometrie durch das verwendete Sekundärmaterial erhöht die benötigte Schnittkraft beim ersten Schnitt.
- Die Änderung der Schneidenbreite ist in einem signifikanten Ausmaß für die Erhöhung der benötigten Schnittkraft ausschlaggebend.
- Die benötigte Schnittkraft durch die Kantenverrundung der konventionellen Hakenklinge steigt nach 50 Zyklen deutlicher an als bei den Repurpose-Hakenklingen.
- Anwender müssen bei der Verwendung des Repurpose-Pappreißmessers anfänglich höhere Schnittkräfte aufbringen, können jedoch von einer längeren Schneidfähigkeit profitieren.

5.3.2 Einfluss des Sekundärmaterials auf die Verschleißbeständigkeit der Hakenklingen

Die Gebrauchseigenschaften der Pappreißmesser in dem zuvor diskutierten Kapitel 5.3.1 hängen maßgeblich von der Verschleißbeständigkeit der Hakenklingen ab. Die Verschleißbeständigkeit der verwendeten Werkstoffe ist keine Materialeigenschaft, da diese durch die Eigenschaft des tribologischen Systems bestimmt wird [166]. In dem vorliegenden Fall bildet die Hakenklinge den Grundkörper und die Bitumenbahn den Gegenkörper der Verschleißpaarung des tribologischen Systems. Ein Zwischenmedium ist in der Systemstruktur nicht vorhanden. Das Beanspruchungskollektiv dieser Systemstruktur bilden die verwendeten Parameter aus Kapitel 3.8.2 und die Anzahl der 50 durchgeführten Schnittzyklen. Die Raumtemperatur und die vorhandene Atmosphäre, bei der die Versuche durchgeführt wurden, haben einen geringen Einfluss auf das tribologische System. Die Verschleißarten beschreiben die Relativbewegung der im tribologischen System wirkenden Körper. Durch die Relativbewegung der Hakenklinge durch die Bitumenbahn können die Schiefersplitter des Gegenkörpers in den Grundkörper, demnach die Hakenklinge, eindringen. Daraus resultierend ergibt sich Furchungverschleiß als Verschleißart.

In den Abbildungen 98 bis 100 können nach dem fünfzigsten Schnittzyklus die typischen Verschleißformen wie Furchen, Kratzer und Riefen der Verschleißart betrachtet werden [166]. An der Schneide der konventionellen Hakenklinge sind diese Verschleißformen deutlich zu sehen (Abb. 98). Die Furchen und Kratzer verlaufen vorwiegend parallel zur Schneide (Abb. 98), was mit der Relativbewegung zwischen Grund- und Gegenkörper übereinstimmt. Neben den Furchen und Kratzern sind darüber hinaus kleinere Ausbrüche an der Schneide zu sehen. Bei den Repurpose-Hakenklingen sind die Ver-

schleißspuren weniger stark ausgeprägt. Nach dem fünfzigsten Zyklus sind kaum sichtbare Furchen oder Kratzer entlang der Schneide zu sehen (Abb. 99 und 100). Auch ist die Relativbewegung der Hakenklinge zu der Bitumenbahn nicht zu identifizieren. Lediglich die Schartigkeit der Schneide hat nach den Verschleißformen sichtbar zugenommen (Abb. 99f). Hier ist jedoch zu beachten, dass an der Schneide im Ausgangszustand ein Grat existierte, der die Schartigkeit möglicherweise verdeckt hat (Abb. 99e). Der Grat wirkt ebenfalls als Verschleißschutz, da dieser als erstes abgetragen wird.

Die sichtbaren Verschleißformen entstehen durch Abrasionsprozesse (Kap. 2.6.2). Hierbei liegt eine Relativbewegung zwischen einem Grundkörper und einem härteren Gegenkörper vor. Während der Relativbewegung dringt der Gegenkörper in den Grundkörper ein, wodurch die Furchen und Kratzer erzeugt werden. In Abrasionsprozessen treten die Mikromechanismen Mikroplügen, Mikrospanen, Mikroermüden und Mikrobrechen auf [181]. Diese einzelnen Mikromechanismen treten bei realen Anwendungen vorwiegend kombiniert auf. Die Verschleißbeständigkeit eines Werkstoffs gegen Abrasion steigt unter anderem mit der Härte an. Mit steigender Härte wird die Furchentiefe reduziert. Die geringe Härte des 75Cr1 (1.2003) mit (402 ± 12) HV5 (Kap. 4.1.1) gegenüber der deutlich höheren Härte von (749 ± 9) HV5 des X153CrMoV12 (1.2379) (Kap. 4.1.4) erklärt die sichtbaren Unterschiede der Verschleißspuren an den Schneiden. Die erhöhte Verschleißbeständigkeit konnte neben den anwendungsnahen, nicht standardisierten Verschleißversuchen (Kap. 3.8.3) ebenfalls in den durchgeführten Einzelritzversuchen (Kap. 3.8.1) nachgewiesen werden. Die Ritztiefe bei der maximalen Ritzkraft von 1000 mN und der Ritzrichtung von 0° , was der Ritzrichtung parallel zur Schneide entspricht, beträgt im Fall des Stahls 75Cr1 (1.2003) $(6,19 \pm 0,28)$ μm (Tab. 15). Beim X153CrMoV12 (1.2379) liegt diese hingegen nur zwischen $(2,28 \pm 0,31)$ μm und $(2,55 \pm 0,33)$ μm in Abhängigkeit der Karbidzeiligkeit (Tab. 18 und 19).

Neben der globalen Härte des Werkstoffs sind in der Matrix eingebettete Hartphasen eine wirksame Möglichkeit, die Verschleißbeständigkeit gegen Abrasion zu erhöhen [166, 187]. Da in dem Werkstoff der konventionellen Hakenklinge keine Hartphasen nachgewiesen werden konnten, trägt lediglich die geringe Härte der Matrix von (402 ± 12) HV5 zur Verschleißbeständigkeit bei (Kap. 4.1.1). In dem Sekundärmaterial X153CrMoV12 (1.2379) aus dem die Repurpose-Hakenklingen hergestellt wurden, konnten hingegen bis zu $(11,7 \pm 0,9)$ Vol.-% der Hartphasen vom Typ M_7C_3 und M_{23}C_6 nachgewiesen werden (Kap. 4.1.4). Die großen blockartigen eutektischen Karbide vom Typ M_7C_3 weisen laut Literatur eine Härte von bis zu 1600 HV auf [56]. Berns gibt die Härte von M_7C_3 -Karbiden in Abhängigkeit der Fe-Cr-Zusammensetzung sogar bis 2200 HV an [188]. Diese in der Matrix eingebetteten Karbide erhöhen neben der globalen Härte auch die partielle Verschleißbeständigkeit gegen einen eindringenden Körper [45]. Die Wirkung der Karbide gegen einen eindringenden Gegenkörper ist in den Ergebnissen der Einzelritzversuche zu sehen (Kap. 4.7.1). In der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme in Abbildung 108d ist die Furche nach einer Ritzlänge von 800 μm dargestellt. Zu erkennen ist,

dass die Furche durch das Auftreffen auf das Karbid schmaler wird. Das Ausheben des Gegenkörpers ist schematisch in Abbildung 9c dargestellt. Neben dem Einfluss der Karbide auf die Ritzbreite und Ritztiefe ist dieser ebenfalls in der aufgezeichneten Querkraft F_t zu sehen. Trifft die Diamantspitze auf ein Karbid, reduziert sich die Querkraft F_t , da durch die hohe Härte eine geringere Reibung vorliegt und somit die Querkraft abnimmt [270]. Im Vergleich der konventionellen Hakenklinge und der Repurpose-Hakenklingen konnte bei den Einzelritzversuchen und den anwendungsnahen Verschleißversuchen gezeigt werden, dass die deutlich höhere Härte und die im Sekundärmaterial enthaltenen Hartphasen einen signifikanten Einfluss auf die verbesserte Verschleißbeständigkeit aufweisen. Die höhere Verschleißbeständigkeit der Repurpose-Hakenklingen bestätigt, die zuvor diskutierten Gebrauchseigenschaften aufgrund der höheren Kantenverrundung und dem daraus resultierenden Anstieg der Schnittkraft (Kap. 5.3.1).

Da die Menge, die Größe und die Verteilung von Hartphasen die Wirksamkeit dieser gegen Abrasionsprozesse beeinflussen, müssen die Faktoren bei den Repurpose-Hakenklingen berücksichtigt werden. Wie bereits erwähnt, sind in dem Sekundärmaterial X153CrMoV12 (1.2379) ein Karbidgehalt von bis zu $(11,7 \pm 0,9)$ Vol.-% gemessen worden. Die Karbide weisen eine Karbidzeiligkeit entlang der Hauptumformrichtung auf [58]. Mithilfe eines entwickelten ambulanten Metallographie-Verfahrens ist vor dem Ausschneiden der Rohlinge die Ausrichtung der Karbidzeiligkeit bestimmt worden (Kap. 4.4). Ausgerichtet zu der identifizierten Karbidzeiligkeit wurden Rohlinge für die Pappreißmesser parallel und senkrecht zu dieser entnommen. In Abbildung 117 sind schematisch die jeweiligen Karbidausrichtungen innerhalb der Hakenklinge zum besseren Verständnis dargestellt. Bei den parallel zur Karbidzeiligkeit entnommenen Hakenklingen liegen die Karbide längs entlang der Schneide. In der Repurpose-Hakenklinge, die senkrecht zur Karbidzeiligkeit entnommen worden ist, verläuft die Karbidzeiligkeit quer zur Schneide. Die anwendungsnahen Verschleißversuche haben gezeigt, dass der Anstieg der maximalen Schnittkraft nach dem fünfzigsten Schnittzyklus bei der Hakenklinge parallel zu der Karbidzeiligkeit höher ist. Der Verlauf der gemittelten Schnittkräfte jedes fünften Schnittzyklus zwischen 50 mm und 200 mm Schnittlänge bestätigt die Annahme, dass die Repurpose-Hakenklinge mit der Ausrichtung parallel zur Karbidzeiligkeit eine geringere Verschleißbeständigkeit aufweist. Die in Tabelle 25 aufgelisteten geometrischen Kennwerte der Schneiden zeigt ebenfalls, dass die Kantenverrundung bei der parallelen Ausrichtung höher ist. Die ermittelten Unterschiede sind quantitativ gesehen gering, jedoch lässt sich eine klare Tendenz ableiten, dass die Entnahme senkrecht zur Karbidzeiligkeit die Verschleißbeständigkeit der Hakenklingen erhöht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die in Umformrichtung gestreckten Karbide besser in der Matrix eingebettet sind (Abb. 117). Bei den auftretenden Abrasionsprozessen können die in der Matrix eingebetteten Hartphasen abbrechen oder aus der Matrix herausgerissen werden, was in Abbildung 117b zu sehen ist. Bei der Rohlingentnahme parallel zur Karbidzeiligkeit sind die enthaltenen Hartphasen nicht ausreichend in der Matrix eingebet-

tet, sodass diese herausgerissen werden. Hierdurch wird der Verschleiß erhöht. Bei den senkrecht zur Karbidzeiligkeit entnommenen Hakenklingen liegen die Karbide zum größten Teil noch in der Matrix eingebettet vor, sodass der vordere Teil des Karbids abbricht, der verbleibende Rest aber weiterhin für eine ausreichende Verschleißbeständigkeit sorgt (Abb. 117a).

Bevor die Ergebnisse der Einzelritzversuche betrachtet werden, muss kurz die Deklaration der Proben für das richtige Verständnis erläutert werden. Die Bezeichnung aller entnommenen Rohlinge bezieht sich auf die globale Ausrichtung der Karbidzeiligkeit innerhalb der hergestellten Repurpose-Werkzeuge und nicht auf die Ausrichtung der Karbide an der Schneide. Dadurch, dass die Schneide an der Seite der Hakenklinge verläuft, ist die Deklaration der Ausrichtung zur Schneide entsprechend der globalen Ausrichtung des Rohlings. Bei den ebenfalls analysierten Drechselmeißeln ist die Schneide hingegen an der Stirnfläche des Werkzeugs. Bei einem zur Karbidzeiligkeit entnommenen Drechselmeißel verläuft die Schneide demnach senkrecht zur Karbidzeiligkeit. Da die Proben des X153CrMoV12 (1.2379) für die Einzelritzversuche aus Rohlingen der Drechselmeißel entnommen worden sind (Abb. 13), muss bei der Betrachtung der Ergebnisse die Deklaration berücksichtigt werden. Die Proben der Einzelritzversuche mit der Deklaration längs weisen dieselbe Ausrichtung der Karbidzeiligkeit zu der Oberfläche bzw. Schneide wie die Ausrichtung der Karbide innerhalb einer Hakenklinge mit der Deklaration quer auf. Der Unterschied der Anordnung zur vorliegenden Karbidzeiligkeit ist in Abbildung 26 dargestellt.

In Abbildung 49 sind die gemittelten Querkräfte F_t der Einzelritzversuche dargestellt. Die Zusammenfassung der Querkräfte F_t in 0° -Richtung weist dieselbe Relativbewegung zwischen der Diamantspitze und dem Gefüge wie zwischen der Hakenklinge und der Bitumenbahn auf. Zu sehen ist, dass die gemittelte Querkraft F_t des X153CrMoV12 (1.2379) in der Ausrichtung parallel (längs), im Durchschnitt eine geringere Querkraft aufweist. Dies stützt ebenfalls die Annahme, dass eine Entnahme der Rohlinge parallel zur vorliegenden Karbidzeiligkeit eine höhere Verschleißbeständigkeit aufweist. Noch einmal sei der Hinweis zur Deklaration der einzelnen Proben gegeben, dass die Ausrichtung parallel (längs) der Einzelritzversuche dieselbe Ausrichtung der senkrechten (quer) Hakenklinge aufweist. Die Messung des Karbidgehalts an den Proben der Einzelritzversuche in Abhängigkeit der Karbidzeiligkeit ergab, dass die senkrechte Ausrichtung einen höheren Karbidgehalt im Querschiff aufweist (Kap. 4.1.4). Die gemessene schlechtere Verschleißbeständigkeit der senkrechten Ausrichtung ist entgegen dem höheren vorliegenden Karbidgehalt. Dies ist ebenfalls auf die schlechtere Einbindung in der Matrix zurückzuführen. In Abbildung 117 ist zu sehen, dass bei der Auswertung des Karbidgehalts die Hartphasen entlang der Schneide eine deutlich höhere Fläche abbilden, jedoch nur oberflächlich eingebunden sein können. Dies bestätigt die Messung, dass der Anteil an Karbiden höher sein kann, jedoch die Karbidzeiligkeit aufgrund der schlechteren Einbettung in der Matrix reduziert wird. Folgende Aussagen können zum Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit der Hakenklinge durch das Sekundärmaterial zusammengefasst werden:

- Die höhere Härte des Sekundärmaterials verbessert die Verschleißbeständigkeit gegenüber der konventionellen Hakenklinge aus dem weicheren 75Cr1 (1.2203).
- Die im X153CrMoV12 (1.2379) enthaltenen Hartphasen verbessern die Verschleißbeständigkeit gegenüber dem karbidfreien 75Cr1 (1.2003) zusätzlich zu der signifikant höheren Härte.
- Die Entnahmerichtung der Repurpose-Rohlinge relativ zur herstellungsbedingten Karbidzeiligkeit hat Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit der Repurpose-Hakenklingen.
- Eine Entnahme der Hakenklingen-Rohlinge parallel zur Ausrichtung der identifizierten Karbidzeiligkeit, sodass die Karbide quer zur Schneide ausgerichtet sind, weist tendenziell eine verbesserte Verschleißbeständigkeit der Hakenklingen auf.

5.3.3 Analyse der Standzeit auf die Umweltleistung der Pappreißmesser

In den beiden Kapiteln zuvor sind die Gebrauchseigenschaften und die Verschleißbeständigkeit der konventionellen und der Repurpose-Hakenklinge miteinander verglichen worden. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Repurpose-Hakenklingen gegenüber den konventionellen Hakenklingen einen signifikant geringeren Verschleiß nach fünfzig Schnittzyklen aufweisen. Um Aussagen über den fortschreitenden Verlauf des Verschleißes nach dem fünfzigsten Schnittzyklus treffen zu können, sind mit den gemittelten Schnittkräften aus Tabelle 23 Ausgleichsgeraden erstellt worden. Diese sind in Kapitel 4.7.3 beschrieben. Es wird angenommen, dass die Hakenklinge stumpf ist, sobald die anfängliche Schnittkraft der konventionellen Hakenklinge verdoppelt ist. Beim Überschreiten dieser Schnittkraft, sowohl von der konventionellen als auch der Repurpose-Hakenklinge, gilt diese als verschlissen bzw. unbrauchbar. Da die anfängliche Schnittkraft der konventionellen Hakenklinge bei ca. 150 N lag (Kap. 4.7.3), beträgt die festgelegte Verschleißgrenze der Schnittkraft 300 N. In Abbildung 118 sind die Ausgleichsgeraden der drei verwendeten Hakenklingen dargestellt. Zu sehen ist, dass die Verschleißgrenze von 300 N bei der konventionellen Hakenklinge nach 147 Schnittzyklen erreicht ist. Die Repurpose-Hakenklingen weisen nach 147 Schnittzyklen in der parallelen Ausrichtung 233 N und in der verschleißbeständigeren senkrechten Ausrichtung lediglich 204 N auf. Anhand dieser Berechnung wird der in Kapitel 5.3.1 erwähnte Aspekt, dass Anwender bei den ersten Schnittzyklen höhere Schnittkräfte aufbringen müssen, jedoch länger von der Schneidfähigkeit der Hakenklinge profitieren können, deutlich.

Die Anzahl der Schnittzyklen für das Erreichen der Verschleißgrenze liegt bei den Repurpose-Hakenklingen signifikant höher. Die Repurpose-Hakenklinge überschreitet die Grenze der Schnittkraft von 300 N erst nach 324 Schnittzyklen, was einer Verdoppelung der Standzeit entspricht. Bei der verschleißbeständigeren senkrechten Ausrichtung der Hakenklinge (Kap. 5.3.2) beträgt die Anzahl der erreichbaren Schnittzyklen 836, was einer Erhöhung der möglichen Schnittzyklen um den Faktor 6 ent-

spricht. Demnach kann gesagt werden, dass die Standzeit der Pappreißmesser durch das Verwenden des Sekundärmaterials X153CrMoV12 (1.2379) für die Hakenklingen die Standzeit mindestens verdoppelt. Das Berücksichtigen der Karbidzeiligkeit kann die Standzeit sogar versechsfachen. Die Verlängerung der Standzeit bzw. die Nutzungsdauer von Produkten ist ebenfalls ein Ziel der 10R-Strategien. Neben der hier durchgeführten Repurpose-Strategie, bei der die Nutzungsdauer des X153CrMoV12 (1.2379) verlängert wird, kann durch die verbesserte Verschleißbeständigkeit ebenfalls die Anzahl an benötigten Hakenklingen reduziert werden. Hierbei ist jedoch auch zu beachten, dass die verschlissenen Hakenklingen nicht entsorgt werden sollten. Durch Nachschleifen der Schneiden, was bereits Stand der Technik bei Schneidwaren ist, kann die stumpfe Schneide instandgesetzt werden, sodass das Pappreißmesser weiterverwendet werden kann. Die erhöhte Verschleißbeständigkeit der Repurpose-Hakenklinge ist dennoch von großem Nutzen, da durch Verschleißprozesse abgetragenes Material für einen Stoffkreislauf verloren ist. Die Auswirkungen der Standzeit auf die Umweltleistung der Pappreißmesser können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Standzeit der Pappreißmesser kann durch das Verwenden des Sekundärmaterials mindestens verdoppelt werden.
- Die Berücksichtigung der Karbidzeiligkeit innerhalb der Repurpose-Produkte kann die Standzeit um den Faktor sechs erhöhen.
- Durch die Repurpose-Strategie und der daraus resultierenden höheren Standzeit kann die Anzahl der benötigten Pappreißmesser reduziert werden, sodass durch die Repurpose-Strategie Ziele von weiteren 10R-Strategien erreicht werden.

5.4 Einfluss des Sekundärmaterials auf den Lebenszyklus von Werkzeugen im Einsatz bei erhöhten Temperaturen

Neben den Pappreißmessern sind im Rahmen der konzipierten Repurpose-Strategie auch Drechselmeißel betrachtet worden. Da das verwendete Sekundärmaterial im Zuge des Herstellungsprozesses für den ersten Lebenszyklus im Sekundärhärtemaximum bei 520 °C angelassen worden ist (Kap. 4.1.4), kann das Sekundärmaterial durch die vorhandene Anlassbeständigkeit bei Anwendungen mit erhöhter Temperatur eingesetzt werden [45]. Hierbei werden ebenfalls der Einfluss des geänderten Materials auf das Verschleißverhalten, die Verschleißbeständigkeit und die Umweltleistung analysiert und diskutiert. Betrachtet werden sowohl zwei verschiedene konventionelle Drechselmeißel, zum einen der Standard-Drechselmeißel aus dem Werkstoff 80CrV2 (1.2235) und zum anderen der High-Performance-Drechselmeißel aus dem Schnellarbeitsstahl HS6-5-2C (1.3343) (Kap. 4.2.2). Diese beiden konventionellen Drechselmeißel werden mit den Repurpose-Drechselmeißeln zur Karbidzeiligkeit parallel und

senkrecht ausgerichtet verglichen (Kap. 4.6.1).

5.4.1 Einfluss des Sekundärmaterials auf das Verschleißverhalten der Drechselmeißel

Mit den konventionellen und den Repurpose-Drechselmeißeln wurden anwendungsnahe Verschleißversuche durchgeführt (Kap. 3.8.2). Während der Verschleißversuche wurde mit jedem Drechselmeißel insgesamt hundertmal in ein Rundholz gestochen. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 15 dargestellt. Gemäß der Literatur müsste das weichere Holz als Grundkörper und die härteren Drechselmeißel als Gegenkörper innerhalb des tribologischen Systems bezeichnet werden [165, 166]. In dem vorliegenden Verschleißversuch wird jedoch der Drechselmeißel als Gegenkörper und das verwendete Rundholz als Grundkörper der Verschleißpaarung bezeichnet. Da bei dem Drechselmeißel Verschleiß unerwünscht ist, wird dieser entgegen der Definition als Grundkörper bezeichnet. In der Systemstruktur ist kein Zwischenmedium vorhanden, jedoch wirkt die Atmosphäre als Umgebungsmedium. Das Beanspruchungskollektiv dieser Systemstruktur bilden die verwendeten Parameter aus Kapitel 3.8.2 und die einhundert durchgeführten Zyklen. Die Raumtemperatur, bei der die Versuche durchgeführt wurden, beeinflusst das tribologische System nicht. Die beim Drechseln entstehenden Anwendungstemperaturen können Einfluss auf das tribologische System nehmen [166]. Die Verschleißarten beschreiben die Relativbewegung der im tribologischen System wirkenden Körper. In dem vorliegenden tribologischen System liegen verschiedene Verschleißarten und Verschleißmechanismen vor, sodass auf diese im Folgenden an entsprechender Stelle eingegangen wird.

Die makroskopischen Aufnahmen der Drechselmeißel zeigen nach den Verschleißversuchen in den Abbildungen 78 bis 81 Unterschiede bei den optischen Verschleißerscheinungen auf. Der Standard-Drechselmeißel weist gegenüber den anderen Drechselmeißeln deutliche Anlassfarben an der Schneide auf (Abb. 78), was auf eine Oxidation der Materialoberfläche zurückzuführen ist [186]. Die Anlassfarben haben sich während des Drechselns von der Drechselmeißelspitze halbkreisförmig ausgebildet. Der High-Performance-Drechselmeißel und die Repurpose-Drechselmeißel weisen hingegen lediglich dunklere Verfärbungen an der Oberfläche auf. Diese Verfärbungen sind zum größten Teil Ruß, der durch anschließendes Reinigen rückstandslos entfernt werden konnte. Bei allen Drechselmeißeln ist auf der linken Seite zu sehen, an welcher Position das Rundholz an der Oberfläche gerieben hat. Hier hat sich ein kreisförmiger Verlauf von Verschleißspuren ausgebildet. Besonders deutlich ist dieses Erscheinungsbild bei dem Standard-Drechselmeißel in Abbildung 78b zu sehen, da in diesem Bereich die Anlassfarben durch den Reibprozess entfernt wurden. Abbildung 119 stellt diesen Bereich mit einer höheren Vergrößerung dar. Des Weiteren ist zu erkennen, dass am Übergang von der Freifläche zur Seitenfläche und direkt an der oberen Schneide weitere Anlassfarben zu sehen sind.

Die aufgezeichneten Temperaturverläufe sind in den Abbildungen 82 bis 85 dargestellt. Aufgetragen

sind die aufgezeichneten Temperaturen der vier Thermoelemente über die Versuchsdauer. Zu sehen ist, dass die Temperaturen während der Versuche auf bis zu 300 °C ansteigen. Die aufgezeichneten Temperaturen des Standard-Drehselmeißels korrelieren mit den sichtbaren Anlassfarben an der Drehselmeißelspitze (Abb. 78), an den Proben für das erstellte Härte-Anlass-Diagramm (Abb. 119) und mit den in der Literatur bekannten Farben für niedriglegierten Werkzeugstahl [271]. In Tabelle 20 sind die maximalen Temperaturen der jeweiligen Thermoelemente dargestellt. Hierbei fällt auf, dass die maximalen Temperaturen an den Positionen T2 über den maximalen Temperaturen an den Positionen T1 liegen, obwohl diese von der angreifenden Schneide weiter entfernt liegen (Abb. 16b). Um auszuschließen, dass es sich hierbei um einen Messfehler handelt, ist in Abbildung 86 ein vergrößerter Ausschnitt des Temperaturverlaufs des Standard-Drehselmeißels dargestellt. Die drei aufeinanderfolgende Amplituden stellen jeweils einen Einstechvorgang während des Verschleißversuchs dar. Zu sehen ist, dass die Temperatur an der Position T1 als erstes ansteigt und nachfolgend die Temperaturen an den Positionen T2 und T3. Die Temperatur T1 steigt als erstes an, da diese mit einem Abstand von 4 mm am nächsten an der Drehselmeißelspitze liegt (Abb. 16). Des Weiteren ist zu sehen, dass bei jedem Zyklus die Temperatur an der Position T2 über die Temperatur an der Position T1 ansteigt, sodass ein Messfehler bei den maximal bestimmten Temperaturen ausgeschlossen werden kann. Die höhere Temperatur an der Position T2 ist auf die zuvor angesprochene Reibung zwischen dem Rundholz und der Seitenfläche des Drehselmeißels, an der das Thermoelement T2 angeschweißt ist, zurückzuführen (Abb. 120). Nachdem die Schnitttiefe von 30 mm erreicht ist, wird der Drehselmeißel zurückgezogen. Hierdurch findet keine weitere Reibung an der Drehselmeißelspitze statt, jedoch weiterhin an der linken Seitenfläche. Aus diesem Grund steigt die Temperatur an der Position T2 weiter an und fällt ebenfalls als letztes ab. Bei den aufgezeichneten Prozesstemperaturen und der vergrößerten Darstellung von drei Amplituden in Abbildung 86 ist zu beachten, dass das verwendete Temperatur-Messgerät vom Typ K204 der Firma VOLTcraft keinen kontinuierlichen Temperaturverlauf aufzeichnet (Kap. 3.8.2). Dieses speichert jede Sekunde einen Temperaturwert der entsprechenden Thermoelemente ab. Hierdurch können mit den dargestellten Amplituden nur Tendenzen abgeleitet werden, da diese nicht den exakten Temperaturverlauf abbilden. Des Weiteren ist erkennen, dass die dargestellten Temperaturkurven über die Versuchsdauer tendenziell abnehmen. Lediglich der Temperaturverlauf des Standard-Drehselmeißels in Abbildung 82 bleibt nahezu konstant. Die abnehmenden Temperaturkurven sind dem Versuchsaufbau geschuldet (Abb. 15). Mit fortschreitender Versuchsdauer, bzw. mit der Anzahl der durchgeführten Einstiche, bewegt sich der Drehselmeißel in Richtung des drehenden Dreibackenfutters. Die dadurch entstehende Luftverwirbelung bewirkt eine aktive Kühlung der Drehselmeißel bzw. des aufgeschweißten Thermoelements an der Oberseite des Drehselmeißels. Bedingt durch diese aktive Luftkühlung nehmen die gemessenen Temperaturen leicht mit der Anzahl an Einstichen ab [272].

In den Abbildungen 87 bis 90 sind die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Drehselmei-

ßelspitzen mit 150-facher Vergrößerung dargestellt. In den Aufnahmen ist deutlich wahrzunehmen, dass der Standard-Drehseimeißel den höchsten sichtbaren Materialabtrag aufweist (Abb. 87). Die bildanalytische Auswertung nach Kapitel 3.8.2 hat einen flächenmäßigen Verlust von zehn Prozent ergeben (Tab. 22). Bei den konventionellen High-Performance-Drehseimeißeln lag der ermittelte Verlust bei ca. sechs Prozent. Die geringsten Verluste weisen die Repurpose-Drehseimeißel auf. Bei diesen liegt der Materialabtrag unter drei Prozent.

Die Drehseimeißelspitzen des High-Performance- und der Repurpose-Drehseimeißel weisen bereits im Ausgangszustand eine Kantenverrundung auf. Aus der Literatur ist bekannt, dass zu hohe Kantenverrundungen negative Auswirkungen auf das Schneidverhalten und das Verschleißverhalten von Schneiden haben. In Untersuchungen war zu beobachten, dass der Freiflächenverschleiß mit zunehmender Schneidkantenverrundung zunimmt. Gleichzeitig zeigten diese Untersuchungen jedoch, dass durch gezielte Schneidkantenverrundung lokale Werkzeugbelastungen und damit einhergehender Verschleiß durch Ausbrüche an der Schneide reduziert werden können [273]. Die in den Abbildungen 88 bis 90 zu sehenden Kantenverrundungen im Ausgangszustand bei dem High-Performance-Drehseimeißel aus HS6-5-2C (1.3343) und bei den Repurpose-Drehseimeißeln aus X153CrMoV12 (1.2379) ist nicht grundsätzlich als negativ anzusehen. Diese ist eher als Schutz gegen Ausbrechen zu beurteilen. Mit einer größer werdenden Kantenverrundung steigt ebenfalls die thermische Belastung im Werkzeug, da durch die Kantenverrundung eine vergrößerte Reibfläche vorliegt [273]. Da bei dem Standard-Drehseimeißel sowohl die höchste Kantenverrundung und die höchste Einsatztemperatur gemessen wurde, korrelieren die Ergebnisse aufgrund des zuvor genannten Zusammenhangs der Kantenverrundung und der Temperaturentwicklung. Die durch Verschleiß steigende Wärme an der Drehseimeißelspitze erklärt den konstanten Temperaturverlauf in Abbildung 82. Die vom Dreibackenfutter verursachte Luftkühlung ist nahezu identisch mit der steigenden Prozesswärme, sodass der Verlauf konstant gehalten wird.

Für eine genauere Betrachtung der konventionellen Drehseimeißelspitzen sind diese mit 1000-facher Vergrößerung in Abbildung 121 sowohl in der Draufsicht als auch in der Seitenansicht dargestellt. In allen Abbildungen sind an den Drehseimeißelspitzen Furchen und Kratzer zu sehen, welche in Abrasionsprozessen unter anderem durch die Mikromechanismen Mikropflügen und Mikrospanen entstehen [45, 165, 166]. Diese Verschleißmechanismen sind vorwiegend bei Furchungverschleiß zu identifizieren [166]. Die Seitenfläche des High-Performance-Drehseimeißels weist trotz der höheren Härte (Kap. 4.1) und dem geringeren gemessenen optischen Verschleiß (Kap. 4.7.2) sichtbar mehr Furchen und Kratzer auf. Darüber hinaus wirken diese deutlich tiefer als bei dem Standard-Drehseimeißel aus 80CrV2 (1.2235). Die Repurpose-Drehseimeißelspitzen sind mit 1000-facher Vergrößerung in Abbildung 122 dargestellt. Diese weisen gegenüber den konventionellen Drehseimeißeln keine wahrnehmbaren Furchen oder Kratzer entlang der Seitenfläche auf. Lediglich an der oberen Schneidkante sind vereinzelt Furchen und Kratzer zu identifizieren. Die Seitenflächen der Repurpose-Drehseimeißel weisen jedoch

oxidierte Bereiche auf (Abb. 80 und 81). Hierbei wirkt der Verschleißmechanismus der tribochemischen Reaktion, genauer gesagt Tribooxidation [166]. Unter Hochtemperaturkorrosion werden alle Formen der Reaktion zwischen einem Werkstoff mit seiner Umgebungsatmosphäre bei erhöhten Temperaturen bezeichnet [186]. Hierbei sind keine wässrigen Elektrolytmedien vorhanden. In dem vorliegenden tribologischen System reagieren die Oberflächen der Drechselmeißel mit dem Sauerstoff der in der Atmosphäre, dem Zwischenmedium, vorhanden ist. In Abbildung 122 sind die entstanden Oxidinseln an der Seitenfläche des Repurpose-Drechselmeißel mit 1000-facher Vergrößerung zu sehen. Diese sind in manchen Bereichen bereits abgeplatzt, was zu Materialverlust führt [274]. Aufgrund seines Legierungssystems weist der HS6-5-2C (1.3343) eine höhere Oxidationsbeständigkeit als der X153CrMoV12 (1.2379) auf. Da der Materialabtrag bei dem High-Performance-Drechselmeißel aus HS6-5-2C (1.3343) jedoch über dem des X153CrMoV12 (1.2379) lag, hat der Materialabtrag durch Oxidation einen geringeren Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit der Drechselmeißel als der Furchungverschleiß. Die Anlassfarben des Standard-Drechselmeißels sind ebenfalls dünne Oxidschichten, die durch Oxidation entstehen [186]. Folgende Aussagen können über den Einfluss des Sekundärmaterials auf das Verschleißverhalten der Drechselmeißel zusammengefasst werden:

- Die höchsten gemessenen Einsatztemperaturen liegen bei allen Drechselmeißeln im Bereich von 300 °C.
- Die konventionellen Drechselmeißel weisen gegenüber den Repurpose-Drechselmeißeln einen höheren Materialabtrag auf.
- Der Standard-Drechselmeißel aus 80CrV2 (1.2235) hat einen doppelt so hohen Materialverlust wie der High-Performance-Drechselmeißel aus HS6-5-2C (1.3343).
- Der High-Performance-Drechselmeißel aus HS6-5-2C (1.3343) weist gegenüber den Repurpose-Drechselmeißeln aus X153CrMoV12 (1.2379) nahezu doppelt so viel Materialabtrag auf.
- Der Materialverlust beim Drechseln entsteht durch Abrasion und Oxidation, wobei Abrasionsprozesse einen höheren Einfluss auf das Verschleißverhalten haben.

5.4.2 Einfluss des Sekundärmaterials auf die Verschleißbeständigkeit der Drechselmeißel

Die Ergebnisse der anwendungsnahen Verschleißversuche der Drechselmeißel haben gezeigt (Kap. 4.7.2), dass die Verwendung des Sekundärmaterials zur Herstellung von Repurpose-Drechselmeißeln positiven Einfluss auf das Verschleißverhalten hat (Kap. 5.4.1). Das Verschleißverhalten der Drechselmeißel hängt wie bei den zuvor diskutierten Pappreißmessern (Kap. 5.3) von der Verschleißbeständigkeit der verwendeten Werkstoffe ab [166]. Da die Härte ein entscheidender Faktor für die Verschleißbeständigkeit ist [45, 166], ist das Ergebnis der Verschleißversuche überraschend, da

der High-Performance-Drehsselmeißel aus dem Schnellarbeitsstahl HS6-5-2C als härtester Werkstoff nicht den geringsten Verschleiß aufweist (Kap. 4.7.2). Den höchsten Verschleiß, demnach den meisten Materialabtrag, verzeichnet wie zu erwarten der Standard-Drehsselmeißel aus dem weichsten Werkstoff (Kap. 4.1.2). In dem Werkstoff 80CrV2 (1.2235) des Standard-Drehsselmeißels konnten keine Hartphasen nachgewiesen werden (Abb. 22). Hierdurch ist ähnlich wie bei dem konventionellen Pappreißmesser die Härte der Matrix der einzige Verschleißschutz gegen Abrasionsprozesse (Kap. 5.3.2). Die Verschleißbeständigkeit von karbidfreien Werkstoffen gegen Abrasion ist bereits in Kapitel 5.3.2 diskutiert worden, sodass hier nicht weiter darauf eingegangen wird.

Die Verschleißversuche der Pappreißmesser haben jedoch bei Raumtemperatur stattgefunden (Kap. 3.8.3). Die Verschleißversuche der Drehsselmeißel haben zwar ebenfalls bei Raumtemperatur stattgefunden (Kap. 3.8.2), jedoch lag die Einsatztemperatur der Drehsselmeißel signifikant darüber (Kap. 4.7.2). Es konnten Temperaturen bis zu 300 °C in einem Abstand von 4 mm hinter der angreifenden Schneide gemessen werden (Tab. 20). Diese gemessenen Einsatztemperaturen liegen fast 100 °C über der im Herstellungsprozess des Standard-Drehsselmeißel verwendeten Anlasstemperatur (Kap. 4.1.2). Steigt die Einsatztemperatur über die Anlasstemperatur während der Drehsselversuche an, werden erneute Anlassvorgänge aktiviert [45, 51]. In Anlassvorgängen werden Spannungen und Versetzungen im Werkstoff abgebaut, was vorwiegend mit einer Reduzierung der Härte einhergeht [45, 51, 57]. Da der 80CrV2 (1.2235) kein Sekundärhärtemaximum aufweist, erweicht der Werkstoff beim Überschreiten der Anlasstemperatur. In dem erstellten Anlassdiagramm des 80CrV2 (1.2235) ist in Abbildung 112 zu sehen, dass die Härte bei der gemessenen Einsatztemperatur von 300 °C bei ca. 625 HV5 liegt. Somit liegt diese ca. 90 HV5 unterhalb der eingestellten Ausgangshärte des Standard-Drehsselmeißels. Die Härtewerte des Anlassdiagramms sind vergleichbar mit den gemessenen Werten an dem Standard-Drehsselmeißel nach dem Verschleißversuch (Kap. 4.7.2). In den Abbildungen 94 bis 96 sind die gemessenen Härteverläufe im Quer- und Längsschliff des verschlissenen Drehsselmeißels aufgetragen. Zu sehen ist, dass der Härteverlauf quer durch den Drehsselmeißel an der linken Seite einen Härtewert von 625 HV5 aufweist. Die aufgezeichnete Einsatztemperatur an dieser Stelle lag bei 300 °C (Tab. 20). Demnach korrelieren die gemessenen Einsatztemperaturen mit den vorliegenden Härtewerten nach dem Verschleißversuch sowie mit dem erstellten Härte-Anlass-Diagramm. Auch der gemessene Temperaturunterschied zwischen den Thermoelementen T2 und T3 ist in dem erstellten Härteverlauf erkennbar. Der Härteverlauf steigt von der linken zur rechten Seite des Drehsselmeißels an (Abb. 95). Durch die niedrigere Temperatur an der Position T3, wo das Thermoelement an der rechten Seite angeschweißt war (Abb. 16), ist die Härte weniger stark reduziert worden. Bei Anlassvorgängen ist die Höhe der Temperatur der entscheidende Faktor und weniger die Zeit [45, 51, 57].

Da die Thermoelemente wie bereits erwähnt zwischen 4 mm und 25 mm von der angreifenden

Schneide entfernt sind (Abb. 16), ist zu erwarten, dass die Temperaturen an der Schneide signifikant höher sind. Das Erscheinungsbild der Anlassfarben bestätigt die Annahme (Abb. 78), dass die Temperaturen an der Drechselmeißelspitze über den gemessenen 300°C liegen, da die Ausbildung der Anlassfarben in der halbkreisförmigen Anordnung und der vorliegenden Reihenfolge der Anlassfarben übereinstimmen (Abb. 119). Die genaue Bestimmung der Temperaturen an der Schneide kann durch ein Simulationsmodell durchgeführt werden [275, 276]. Hierzu können die in Kapitel 4.8 dargestellten Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit und die aufgezeichneten Temperaturverläufe verwendet werden. Als Stützstellen für die Simulation müssten die Positionen T1 und T4 der Thermoelemente verwendet werden. Über den Abstand dieser und dem Zeit-Temperaturverlauf kann mithilfe der gemessenen Wärmeleitfähigkeit die Temperatur an der Schneide simuliert werden. Hierzu muss ein inverses Simulationsmodell aufgebaut werden, wie es Huang et al. in seiner Veröffentlichung zur Vorhersage von Temperaturen in Schneidwerkzeugen gemacht hat [275]. Durch die Einsatztemperaturen von bis zu 500°C reduziert sich die Härte an der angreifenden Schneide signifikant weiter. Laut dem erstellten Anlassdiagramm liegt die Härte des 80CrV2 (1.2235) bei einer Temperatur von 500°C lediglich bei 400 HV5 und somit 311 HV5 unterhalb der Ausgangshärte von 711 HV5 (Kap. 4.1.2). Gegenüber dem High-Performance-Drechselmeißel ist die Härte mehr als die Hälfte geringer bei diesen Einsatztemperaturen. Neben der Tatsache, dass der Standard-Drechselmeißel aus 80CrV2 (1.2235) die geringste Härte hat und keine Hartphasen in der Matrix eingebettet sind, was eine schlechtere Verschleißbeständigkeit bedeutet, weist dieser darüber hinaus keine ausreichende Anlassbeständigkeit für die vorliegenden Einsatztemperaturen auf. Dies verschlechtert die Verschleißbeständigkeit weiter [166]. Durch die fehlende Anlassbeständigkeit und dem daraus resultierenden Härteverlust nimmt die Verschleißbeständigkeit weiter ab, was den signifikant höheren Materialabtrag des Standard-Drechselmeißels gegenüber den anderen Drechselmeißeln erklärt (Kap. 4.7.2). Die Werkstoffe aus denen die High-Performance- und die Repurpose-Drechselmeißel hergestellt wurden, sind während des Herstellungsprozesses bei über 500°C angelassen worden (Kap. 4.1). Dadurch weisen diese eine ausreichende Anlassbeständigkeit für die Einsatztemperaturen während des Drechselns auf. Bei diesen Drechselmeißeln konnte kein Härteverlust festgestellt werden, sodass die Ausgangshärte während des gesamten Verschleißversuchs zur Verschleißbeständigkeit beiträgt.

Die Verschleißbeständigkeit hängt neben der Härte und den in der Matrix eingebetteten Hartphasen auch von der Größe und Verteilung dieser ab [51]. Der HS6-5-2C, aus dem die High-Performance-Drechselmeißel hergestellt werden, weist mit (853 ± 5) HV5 die höchste Härte auf (Kap. 4.1.3). Des Weiteren konnten bis zu $(11,4 \pm 0,5)$ Vol.-% in der Matrix eingebundene Hartphasen nachgewiesen werden. Der Anteil der nachgewiesenen Hartphasen ist mit denen des Sekundärmaterials vergleichbar. In diesem konnte ein Anteil von bis zu $(11,2 \pm 0,3)$ Vol.-% gemessen werden (Kap. 4.1.4). Beide Werkstoffe sind über die schmelzmetallurgische Route hergestellt worden, demnach weisen diese eine

herstellungsbedingte Karbidzeiligkeit auf [58]. In Abbildung 23 sind Gefügaufnahmen des Schnellarbeitsstahls HS6-5-2C (1.3343) dargestellt. Zu sehen sind Bereiche mit Anhäufungen von Karbiden, die vorwiegend eine zirkuläre Form mit geringer Größe aufweisen. In dem Kaltarbeitsstahl X153CrMoV12 (1.2379) sind vorwiegend die großen eutektischen, Cr-reichen Karbide vom Typ M_7C_3 enthalten. Diese weisen eine richtungsabhängige Form und Zeiligkeit auf, die durch das Brechen und Ausrichten während des Walzprozesses entsteht [45, 51, 58]. Die gebrochenen Karbidstücke können teilweise eine Größe von über 20 μm aufweisen, was in Abbildung 24 zu sehen ist. Neben der unterschiedlichen Karbidgröße der in den beiden Stählen enthaltenen Hartphasen fällt auf, dass die kleinen Karbide des HS6-5-2C (1.3343) trotz der gewissen Anhäufungen ein ausgewogeneres Verhältnis aus Matrix und Karbide aufweisen. Dies wird deutlich, wenn das Gefüge mit 5000-facher Vergrößerung aus den Abbildungen 23 und 24 verglichen wird. In dem Gefüge des HS6-5-2C (1.3343) sind die Karbide gleichmäßig über den aufgenommenen Bereich verteilt, wohingegen beim X153CrMoV12 (1.2379) lediglich zwei große Karbide mit acht kleineren sichtbar sind, sodass die freie Matrix-Weglänge signifikant höher ist. Die unterschiedlichen Größen und Verteilungen der Karbide sind ebenfalls in den Diagrammen der Querkraft F_t und den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Furchen aus den Einzelritzversuchen zu sehen (Kap. 4.7.1). Die aufgezeichneten Querkräfte F_t sind in den Abbildungen 46 bis 48 über die Ritzlänge aufgetragen. Bei den Querkraften des HS6-5-2C (1.3343) und des X153CrMoV12 (1.2379) sind Ausschläge im Kraftverlauf zu sehen. In dem Diagramm des X153CrMoV12 (1.2379) sind diese deutlich zu sehen, wohingegen die Diagramme des HS6-5-2C (1.3343) deutlich glatter verlaufen. Dies ist besonders in Abbildung 48 zu sehen. Die Ausschläge bzw. die teilweise signifikanten Reduzierungen der Querkraft F_t wird durch das Auftreffen der Diamantenspitze auf ein Cr-reiches M_7C_3 Karbid verursacht. Aufgrund der hohen Härte von 1600 HV des M_7C_3 [56] nimmt die benötigte Querkraft beim Kratzen auf der Karbidoberfläche ab [270]. Durch die zuvor angesprochene gleichmäßigere Verteilung der kleinen Karbide im HS6-5-2C (1.3343) sind diese kontinuierlich in der Furche des Einzelritzversuchs vorhanden, was in Abbildung 75 ersichtlich ist. Aus diesem Grund sind die Ausschläge im aufgezeichneten Querkraftverlauf deutlich geringer. In Abbildung 91 sind rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von der seitlichen Oberfläche des High-Performance-Drehseimeißels dargestellt. Neben den quer verlaufenden Schleifriefen sind vereinzelt Furchen und Kratzer zu sehen, die auf ein M_6C -Karbid treffen und dadurch umgelenkt oder gestoppt werden. Der Mechanismus, bei dem der eindringende Körper aus der Matrix ausgehoben wird, ist in Abbildung 9 dargestellt [45]. In Abbildung 91b ist allerdings auch zu erkennen, dass ein Karbid eine Furche verursacht hat und sich dabei in der Matrix festgesetzt hat. Dies deutet darauf hin, dass die Karbide zu klein und nicht ausreichend in der Matrix eingebettet sind. Nach dem Ausbrechen aus der Matrix wirken diese selber als harte, abrasive Teilchen und führen dadurch zu erhöhtem Materialabtrag während des Verschleißversuchs. Die Einzelritzversuche haben gezeigt, dass bei dem

Schnellarbeitsstahl HS6-5-2C (1.3343) vorwiegend Mikrospanen als Mechanismus auftritt (Kap. 4.7.1). Daher wird davon ausgegangen, dass die Furchen während der Drechselversuche aus Kapitel 3.8.2 vorwiegend durch Mikrospanen entstanden sind. Somit kann der höhere Materialabtrag des High-Performance-Drechselmeißels aus HS6-5-2C (1.3343) gegenüber den Repurpose-Drechselmeißeln aus X153CrMoV12 (1.2379) erklärt werden.

Die geringere Verschleißbeständigkeit des HS6-5-2C (1.3343) kann ebenfalls durch die Ergebnisse der Einzelritzversuche bestätigt werden. Die geometrischen Ritzkennwerte aus Kapitel 4.7.1 zeigen, dass der HS6-5-2C (1.3343) am Anfang der Einzelritze geringere Ritztiefen gegenüber dem X153CrMoV12 (1.2379) aufweist. Dies ist auf die höhere Härte und die kleinere freie Matrix-Weglänge zurückzuführen. Da die Ritzkraft mit fortschreitender Ritzlänge steigt, bewirken die hohe Härte und die gleichmäßige Verteilung der kleineren M_6C -Karbide eine hohe Verschleißbeständigkeit. Mit steigender Ritzkraft über die Ritzlänge ist jedoch zu sehen, dass die geometrischen Ritzkennwerte aus Kapitel 4.7.1 auf eine bessere Verschleißbeständigkeit des Sekundärmaterials hinweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit steigender Ritzkraft ein größerer Abrasivpartikel in die Materialoberfläche eindringt. In Abbildung 9 ist zu sehen, dass eine wirksame Größe an Karbiden (Abb. 9b) eine höhere Verschleißbeständigkeit aufweist als zu kleine Karbide (Abb. 9a) [45]. Ähnlich verhält es sich beim Vergleich des HS6-5-2C (1.3343) und des X153CrMoV12 (1.2379). Die kleinen M_6C -Karbide des HS6-5-2C können herausgerissen oder in die Matrix gedrückt werden, sodass keine ausreichende Verschleißbeständigkeit gewährleistet ist. In den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Ritzspur ist zu sehen (Abb. 75), dass die im HS6-5-2C (1.3343) enthaltenen Hartphasen innerhalb der Furche in die darunter liegende Matrix gedrückt werden. Beim Betrachten der Ritzspur des X153CrMoV12 ist zu erkennen, dass die enthaltenen M_7C_3 wirksamen Verschleißschutz auch bei höheren Ritzkräften bieten. In Abbildung 76d ist zu sehen, wie die Ritzspur durch das Auftreffen auf ein Karbid schmaler wird. Dieser Mechanismus ist in Abbildung 9c zu sehen [45, 270]. Die Ergebnisse der Einzelritzversuche stützten die Ergebnisse der Drechselversuche, dass der HS6-5-2C (1.3343) aufgrund der kleineren enthaltenen Hartphasen eine geringere Verschleißbeständigkeit aufweist.

Ähnlich wie bei den Repurpose-Pappreißmessern aus Kapitel 5.3.2 können auch bei den Ergebnissen der Repurpose-Drechselmeißel Unterschiede im Verschleißverhalten in Abhängigkeit der Karbidausrichtung festgestellt werden. Erneut wird kurz auf die Deklaration der Drechselmeißel eingegangen. Bei den Repurpose-Drechselmeißeln, die parallel zu der vorliegenden Karbidzeiligkeit entnommen wurden, verlaufen die Karbide quer zur Schneide. Demnach verlaufen die Karbide bei den senkrecht zur Karbidzeiligkeit entnommenen Repurpose-Drechselmeißeln längs zur Schneide. In Abbildung 92 sind Gefügaufnahmen der Werkzeugspitze dargestellt, in denen die Ausrichtung der Schneide zu der Karbidzeiligkeit deutlich wird. Die Repurpose-Drechselmeißel parallel zu der Karbidzeiligkeit haben bei den durchgeführten Verschleißversuchen weniger Materialabtrag aufgewiesen. Wie bereits

im Kapitel 5.3.2 bei den Anwendungen unter Raumtemperatur angesprochen, sind die M_7C_3 -Karbide quer zur Schneide besser in der Matrix eingebunden. Diese können direkt an der Schneide abbrechen, bilden aber weiterhin eine gute Verschleißbeständigkeit, was schematisch in Abbildung 123 dargestellt ist. In der Gefügaufnahme der Repurpose-Drehselmeißel ist zu sehen, dass bei der parallelen Ausrichtung in Abbildung 92a signifikant mehr Hartphasen entlang der Schneide vorhanden sind, was auf eine höhere Verschleißbeständigkeit aufgrund des Karbidverhaltens aus der schematischen Abbildung 123 hindeutet. Die daraus resultierende bessere Verschleißbeständigkeit dieser Karbidzeiligkeit zur angreifenden Schneide ist hinreichend in Kapitel 5.3.2 diskutiert, sodass hier nicht weiter darauf eingegangen wird.

Einfluss der thermophysikalischen Eigenschaften auf die Verschleißbeständigkeit

Zuvor wurden bereits die erreichten Einsatztemperaturen und der Einfluss der Anlassbeständigkeit auf die Verschleißbeständigkeit der Drehselmeißel diskutiert. Bei den aufgezeichneten Temperaturen an der Position T4 sind bei den Repurpose-Drehselmeißeln signifikante Unterschiede in der Höhe der gemessenen Temperatur zu sehen. Trotz der nahezu identischen maximal Temperatur von ca. 290 °C an der vordersten Messstelle T1, weist die 21 mm dahinter liegende Messstelle T4 eine Differenz von 15 °C auf. Da die verwendeten Repurpose-Drehselmeißel aus demselben Sekundärmaterial, bzw. aus demselben verschlissenen Maschinenkreismesser ausgeschnitten wurden, ist der einzige Unterschied, durch den die gemessenen Temperaturen signifikant abweichen können, die Karbidzeiligkeit innerhalb der Repurpose-Drehselmeißel. Um den Einfluss der Karbidzeiligkeit auf die Wärmeabfuhr an der angreifenden Schneide zu analysieren, ist die Wärmeleitfähigkeit bestimmt worden (Kap. 3.9). Alle Messungen erfolgten im Bereich zwischen Raumtemperatur und 500 °C, da die Höhe der Wärmeleitfähigkeit temperaturabhängig ist. Durch die Messung bis zu der Temperatur von 500 °C kann der Einfluss während des Drehselns analysiert werden. Die Proben sind für diese Untersuchung aus den Drehselmeißeln in Abhängigkeit der Karbidzeiligkeit entnommen worden (Abb. 20a). Hierbei ist zu beachten, dass die Proben aufgrund der benötigten Geometrie für die Temperaturleitfähigkeit (Kap. 3.9.2) nicht in Abhängigkeit der Karbidzeiligkeit entnommen werden konnten. Hierdurch konnte die Wärmeleitfähigkeit bei dem X153CrMoV12 (1.2379) nicht in Abhängigkeit der Karbidzeiligkeit ermittelt werden. Lediglich der spezifische elektrische Widerstand konnte in Abhängigkeit der Karbidzeiligkeit bestimmt werden. Mithilfe dieser Werte und unter Verwendung des Wiedemann-Franz-Lorenz-Gesetzes ist der elektrische Anteil λ_e berechnet worden, sodass dennoch der Einfluss der Karbidzeiligkeit analysiert werden kann. Die Ergebnisse der elektrischen Wärmeleitfähigkeit sind in Abbildung 111 dargestellt. Die elektrische Wärmeleitfähigkeit steigt bei allen Werkstoffen der verwendeten Drehselmeißel über

die Messtemperatur an, was an der steigenden Beweglichkeit der Elektronen liegt [277–279]. Bei den Messungen des X153CrMoV12 (1.2379) ist zu sehen, dass zwischen den Messungen in Abhängigkeit der Karbidzeiligkeit leichte Unterschiede vorliegen (Abb. 111). Die parallel zur Karbidzeiligkeit entnommenen Proben weisen gegenüber den senkrecht zur Karbidzeiligkeit entnommenen eine höhere elektrische Wärmeleitfähigkeit auf, was die gemessenen Temperaturunterschiede an der Position T4 bestätigt (Tab. 20). Die Unterschiede sind auf die freie Matrix-Weglänge zurückzuführen, was in Abbildung 124 schematisch dargestellt ist. Bei der parallelen Ausrichtung in Abbildung 124a kann der Wärmestrom mit der Karbidzeiligkeit in das Werkzeug abgeführt werden. Die Karbide in der senkrechten Ausrichtung in Abbildung 124b wirken hingegen wie eine Barriere, die vom Wärmestrom umgangen bzw. langsamer durchquert werden kann. Durch die Barriere der Karbidzeiligkeit wird die Temperatur langsamer von der angreifenden Schneide abgeführt, sodass diese sich im vorderen Bereich anstaut. Daher weist diese Ausrichtung eine höhere Temperatur an der Position T4 auf.

Eine schnelle Wärmeabfuhr von der angreifenden Schneide ist in Schneidprozessen anzustreben, da die Lebensdauer durch die thermische Belastung reduziert werden kann [220]. In Abbildung 110 sind die gemessenen Wärmeleitfähigkeiten des 80CrV2 (1.2235), HS6-5-2C (1.3343) und X153CrMoV12 (1.2379) dargestellt. Zu sehen ist, dass der 80CrV2 (1.2235) zwischen Raumtemperatur und 250 °C die höchste Wärmeleitfähigkeit aufweist. Aus der Literatur ist bekannt, dass reines Eisen die höchste Wärmeleitfähigkeit hat [202–204]. Durch die Zugabe von Legierungselementen nimmt diese signifikant ab [206, 207]. Da der 80CrV2 (1.2235) die geringsten Anteile an Legierungselementen hat (Kap. 4.1), bestätigt dies das Ergebnis der höchsten Wärmeleitfähigkeit (Abb. 110). Der HS6-5-2C (1.3343) weist eine Wärmeleitfähigkeit zwischen dem 80CrV2 (1.2235) und dem X153CrMoV12 (1.2379) auf. Obwohl der HS6-5-2C (1.3343) und der X153CrMoV12 (1.2379) ähnliche Gehalte an Legierungselementen und Karbidvolumen aufweisen (Kap. 4.1), ist die Wärmeleitfähigkeit des HS6-5-2C (1.3343) bei Raumtemperatur $10 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ höher als bei dem Sekundärmaterial. Da Cr die Wärmeleitfähigkeit stärker verringert als Mo, erklärt dies den Unterschied und die geringste Wärmeleitfähigkeit beim X153CrMoV12 (1.2379) [210, 212]. Die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der Werkstoffe sind ebenfalls an den aufgezeichneten Temperaturen an den Positionen T1 und T4 zu sehen. Trotz der höchsten Temperatur T1 weist der Standard-Drehseißel aus 80CrV2 (1.2235) die geringste Temperatur T4 auf (Tab. 20). Dies ist auf die schnelle Wärmeabfuhr in den gesamten Drehseißel zurückzuführen. Mit steigender Messtemperatur, demnach auch mit steigender Einsatztemperatur, verringert sich die Wärmeleitfähigkeit des 80CrV2 (1.2235) signifikant (Abb. 110a). Zu erkennen ist ein deutlicher Ausschlag nach unten bei 300 °C, was auf erneute Anlassvorgänge beim Überschreiten der Anlasstemperatur zurückzuführen ist. Außerdem ist aus der Literatur bekannt, dass bei niedriglegierten Stählen die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Temperatur abnimmt. Die Wärmeleitfähigkeit der hochlegierten Stähle steigt dagegen bei höheren Messtemperaturen [205, 213]. Bezogen auf die

Verschleißbeständigkeit der Drechselmeißel wirkt sich eine abfallende Wärmeleitfähigkeit bei steigenden Einsatztemperaturen negativ aus. Mit steigender Einsatztemperatur muss die Wärmeleitfähigkeit der Werkstoffe ebenfalls ansteigen, sodass die höhere Wärme schneller von der angreifenden Schneide abgeführt werden kann, wie es bei dem High-Performance und den Repurpose-Drechselmeißeln zu sehen ist.

Der Einfluss des Sekundärmaterials auf die Verschleißbeständigkeit von Drechselmeißeln kann mit folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Aufgrund der geringen Anlassbeständigkeit erweicht das Material des Standard-Drechselmeißels, was eine Reduzierung der Verschleißbeständigkeit bedeutet.
- Die im HS6-5-2C enthaltenen Hartphasen werden während der Anwendung herausgerissen, so dass der High-Performance-Drechselmeißel selbstständig zum höheren Materialabtrag beiträgt.
- Die Karbidzeiligkeit des Sekundärmaterials weist Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit der Repurpose-Drechselmeißel auf. Verläuft die Karbidzeiligkeit parallel in den Drechselmeißeln, demnach quer zur Schneide, verringert sich der Materialabtrag aufgrund besserer Verschleißbeständigkeit gegen Abrasionsprozesse.
- Die parallele Karbidzeiligkeit in den Drechselmeißeln erhöht die Wärmeabfuhr von der Schneide, was die Verschleißbeständigkeit ebenfalls verbessert.
- Die Wärmeleitfähigkeit des Standardmeißels reduziert sich mit steigender Temperatur, was den Anlassprozess und somit die Verringerung der Härte verstärkt.

5.4.3 Analyse der Standzeit auf die Umweltleistung der Drechselmeißel

In den beiden Kapiteln zuvor ist das Verschleißverhalten der konventionellen Drechselmeißel mit den Repurpose-Drechselmeißeln verglichen worden (Kap. 5.4.1). Die konventionellen Drechselmeißel können zwischen dem Standard- und dem High-Performance-Drechselmeißel unterschieden werden (Kap. 4.2.2). Die Ergebnisse der Verschleißversuche haben gezeigt, dass der Verschleiß des Standard-Drechselmeißels aus 80CrV2 (1.2235) doppelt so hoch ist wie im Fall des High-Performance-Drechselmeißels aus (1.3343). Das heißt, es müssen zwei Standard-Drechselmeißel hergestellt werden, um dieselbe Standzeit wie vom High-Performance-Drechselmeißel zu erreichen. Unter Berücksichtigung des Produktionsmixes aus Tabelle 7, der den Energiewert für die Herstellung von einem Kilogramm des Materials angibt, ist zu sehen, dass die benötigte Energie für ein Kilogramm 80CrV2 (1.2235) ca. ein Viertel der Energie für ein Kilogramm HS6-5-2C (1.3343) beträgt. Da für die Herstellung der Drechselmeißel neben dem Material noch weitere Fertigungsprozesse benötigt werden (Kap. 4.2.2), steigt mit

der Anzahl an zu fertigenden Werkzeugen der benötigte Energiebedarf pro Stück. Hier ist zu beachten, wie hoch der Energieeinsatz für das Material und die Fertigungsroute gegenüber der erreichbaren Standzeit ist. Für eine korrekte Ressourcenbilanzierung ist eine ausführliche Lebenszyklus-Analyse notwendig, die den Umfang dieser Arbeit übersteigt.

Die Ergebnisse haben darüber hinaus gezeigt, dass die Repurpose-Drehsselmeißel den geringsten Verschleiß aufweisen (Kap. 4.7.2). Der Verschleiß konnte, je nach Ausrichtung der Karbidzeiligkeit der Repurpose-Drehsselmeißel, gegenüber den High-Performance-Drehsselmeißeln noch einmal halbiert werden. Das bedeutet, dass die Repurpose-Drehsselmeißel mit einer parallelen Karbidzeiligkeit die doppelte Standzeit der High-Performance und fast die fünffache Standzeit der Standard-Drehsselmeißel aufweisen. Da die Repurpose-Drehsselmeißel aus einem verschlissenen Maschinenkreismesser entnommen wurden und dieses Material durch die konzipierte Repurpose-Strategie weiterverwendet werden kann, wird die benötigte Energie für die Herstellung von Werkzeugstahl nicht berücksichtigt. Auch der Einfluss des Sekundärmaterials auf den Produktionsprozess ist bereits in Kapitel 5.1.3 diskutiert worden. Demnach können ähnlich wie bei den Pappreißmessern (Kap. 5.3.3) mehrere Ziele der 10R-Strategien erreicht werden. Zum einen wird durch die Repurpose-Strategie das Maschinenkreismesser als Sekundärmaterial in anderen Werkzeugen weiterverwendet und zum anderen wird durch das Sekundärmaterial mindestens eine Verdoppelung der Standzeit erreicht. Darüber hinaus müssen weniger Werkzeuge aus zum Teil hochlegiertem Stahl mit kritischen Legierungselementen hergestellt werden. Die Auswirkungen der Standzeit auf die Umweltleistung der Drehsselmeißel können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Standzeit und der Ressourceneinsatz unterscheiden sich bereits bei den konventionellen Drehsselmeißeln signifikant.
- Die Standzeit der Drehsselmeißel kann durch das Verwenden des Sekundärmaterials mindestens verdoppelt werden.
- Die Berücksichtigung der Karbidzeiligkeit innerhalb der Repurpose-Drehsselmeißel kann die Standzeit um den Faktor fünf gegenüber dem konventionellen Drehsselmeißel erhöhen.
- Durch die Repurpose-Strategie und der daraus resultierenden höheren Standzeit kann die Anzahl der benötigten Drehsselmeißel reduziert werden, sodass durch die Repurpose-Strategie Ziele von weiteren 10R-Strategien erreicht werden.
- Durch die Repurpose-Strategie müssen weniger Werkzeuge aus zum Teil hochlegiertem Stahl mit kritischen Legierungselementen hergestellt werden.

5.5 Materialauswahl bei Werkzeugen unter Berücksichtigung von Zielen der Circular Economy

Die Materialauswahl ist, wie in Kapitel 5.1.1 erwähnt, ein Teil des Konstruktionsprozesses innerhalb der Produktentwicklung. Hierzu wird in der ersten Phase eine Materialanforderungsliste erstellt. Ausgehend von der Anforderungsliste des Produktes können Materialanforderungen ermittelt werden, da die Produkteigenschaften im Wesentlichen durch die Materialeigenschaften bestimmt werden [245, 280, 281]. Die Materialanforderungsliste beinhaltet alle Ziele, Forderungen und gegebenenfalls Wünsche an den Werkstoff mit dazugehörigen Zielgrößen. Diese Forderungen an Materialeigenschaften sind vorwiegend mechanische Eigenschaften wie die Härte, die Zugfestigkeit oder die Zähigkeit. Weitere Anforderungen können thermische Eigenschaften wie die Wärmeleitfähigkeit sein. Oftmals wird auch eine Anforderung an die Beständigkeit gegen Frisch- oder Salzwasser gestellt. Neben den Materialeigenschaften gibt es auch Anforderungen an Verarbeitungseigenschaften wie z. B. die Schweißbeignung. Neben den Materialanforderungen und Verarbeitungseigenschaften sind die Kosten für eine wirtschaftliche Fertigung maßgeblich entscheidend. Anhand der Materialanforderungsliste wird eine Vorauswahl und anschließend eine Feinauswahl von Materialien getroffen, die abschließend evaluiert und validiert werden.

In etablierten Materialauswahlprozessen werden derzeit kaum Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Materialien gestellt. Erst in den letzten Jahren fand die Berücksichtigung von nachhaltigen Produkten im Produktentwicklungsprozess statt. Besonders bei Konsumgütern stieg die Nachfrage und demnach das Angebot nach nachhaltigen Produkten an. In der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie wird derzeit vorwiegend eine recyclinggerechte Konstruktion fokussiert. Werden darüber hinaus ebenfalls nachhaltige Materialien verwendet, beschränkt sich dies vorwiegend auf Hölzer oder Kunststoffe bspw. zur Herstellung von Griffen oder Verpackungen. Bei den nachhaltigen Hölzern wird z. B. eine FSC-Zertifizierung gewählt und Kunststoffgriffe werden aus recyceltem Granulat hergestellt [282]. Die metallischen Werkstoffe der Klingen finden derzeit nahezu keine Berücksichtigung bei der nachhaltigen Produktentwicklung in der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie. Hierzu trägt bei, dass in den meisten Nachhaltigkeitsbewertungen lediglich Stahl betrachtet wird, jedoch der Einfachheit halber nicht zwischen verschiedenen chemischen Zusammensetzungen unterschieden wird [283, 284]. Da Maßnahmen zur Materialeffizienz stark produktbezogen sind [30], sollte ein Schwerpunkt bei der Materialauswahl auf den Legierungselementen liegen, da diese den Hauptengpass bei der Stahlversorgung bilden [285, 286]. Dass die Berücksichtigung von nachhaltigem metallischen Werkstoffen in anderen Industriezweigen jedoch Anwendung findet, zeigen mehrere Veröffentlichungen [287–289]. Hierbei wird z. B. das kritische Legierungselement Co durch neuartige Legierungskonzepte unter Berücksichtigung von benötigten Materialanforderungen reduziert [289].

Die Ergebnisse der Verschleißversuche der Drechselmeißel im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt (Kap. 4.7.2), dass in der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie die metallischen Werkstoffe eine entscheidende Rolle beim Ressourceneinsatz und der zu erreichenden Standzeit der Drechselmeißel haben. Daher ist eine Berücksichtigung des Ressourceneinsatzes und der daraus resultierenden Standzeit bei der Produktentwicklung der Drechselmeißel sinnvoll. Die benötigten Energiewerte aus Tabelle 7 für die Herstellung und die Verarbeitung der verschiedenen Werkstoffe weisen signifikante Unterschiede auf. Die größten Unterschiede sind bei den benötigten Energien für die Herstellung der Werkstoffe zu sehen. Für die Primärherstellung der Werkzeugstähle werden zwischen 33,90 MJ und 153 MJ Energie pro erzeugtem Kilogramm Stahl benötigt [229]. Die Höhe der benötigten Energien ist abhängig vom Typ und der Menge der enthaltenen Legierungselemente. Für ein Kilogramm des in den Stählen enthaltenen Legierungselements Vanadium wird 516 MJ Energie benötigt [290]. Ebenfalls energieintensiv sind die in hohen Anteilen im HS6-5-2C (1.3343) enthaltenen Legierungselemente Wolfram (133 MJ) und Molybdän (117 MJ) [290]. Das im Stahl X153CrMoV12 (1.2379) in größeren Mengen enthaltene Legierungselement Chrom benötigt hingegen lediglich 40,2 MJ, was dennoch fast doppelt so hoch ist wie für die Fe-Basis (23,1 MJ) [290]. Andere Quellen geben deutlich höhere Energiewerte für die einzelnen Legierungselemente an. In der Datenbank CES Selector liegt der Energiewert für ein Kilogramm Cr bei 577 MJ und für Vanadium bei 3710 MJ [229]. An diesen signifikant unterschiedlichen Werten wird die Problematik der verfügbaren Daten über Stahl und deren Legierungselemente in Bezug auf die Nachhaltigkeit erneut deutlich. Die benötigte Primärenergie des HS6-5-2C (1.3343) ist durch die hohen Anteile der kritischen Legierungselemente W, Mo und V signifikant höher als bei den anderen Werkzeugstählen (Tab. 7). Bei der derzeitigen Stahlproduktion liegt ein Verhältnis des Materialeinsatzes von ca. 60 Ma.-% Primärstahl zu 40 Ma.-% Recyclingmaterial vor [40]. Aus diesem Verhältnis ergeben sich die Daten des Energiemixes der jeweiligen Stähle in Tabelle 7.

Die Standzeitanalyse der Drechselmeißel hat gezeigt, dass die Drechselmeißel aus X153CrMoV12 (1.2379) gegenüber den High-Performance-Drechselmeißeln aus HS6-5-2C (1.3343) eine doppelt so hohe Standzeit aufweisen. Im Rahmen der konzipierten Repurpose-Strategie stand der Stahl X153CrMoV12 (1.2379) als Sekundärmaterial zur Verfügung und musste somit nicht zusätzlich hergestellt werden. Im Hinblick auf die diskutierten Standzeiten aus Kapitel 5.4.3 und den Energiewerten aus Tabelle 7 ist die Materialauswahl der konventionellen Drechselmeißel im Rahmen der Linearwirtschaft unter Berücksichtigung von Zielen der 10R-Strategie zu überdenken. Diese Ziele sind eine möglichst lange und intensive Nutzung von Produkten bzw. Materialien bei gleichzeitig möglichst geringem Einsatz von Energie zur Herstellung dieser Produkte [13]. Übertragen auf die Drechselmeißel bedeutet dies, dass diese eine möglichst lange Standzeit aufweisen sollen. Die benötigte Energie für das Herstellen des Materials und die Fertigung der Drechselmeißel sollen jedoch gleichzeitig möglichst gering ausfallen. Die Verschleißversuche haben gezeigt (Kap. 4.7.2), dass die Drechselmeißel aus dem Stahl

X153CrMoV12 (1.2379) die höchste Standzeit und somit die intensivste Produktnutzung aufweisen. Um das Ziel einer möglichst langen und intensiven Produktnutzung zu erreichen, ist die Verwendung des Stahls X153CrMoV12 (1.2379) von Vorteil. Im Vergleich mit der benötigten Energie des HS6-5-2C (1.3343) aus Tabelle 7 ist zu sehen, dass dieser mehr als doppelt so viel bei der Herstellung benötigt. Demnach kann gesagt werden, dass durch die Verwendung des Stahls X153CrMoV12 (1.2379) die Standzeit verdoppelt und der Ressourceneinsatz für das Material halbiert werden kann. Auch bei der Fertigungsroute können durch den Materialwechsel Ressourcen eingespart werden. Bei der benötigten Wärmebehandlung wird der Schnellarbeitsstahl HS6-5-2C (1.3343) bei 1210 °C austenitisiert (Kap. 4.1.3). Die Austenitisierungstemperatur des Stahls X153CrMoV12 (1.2379) liegt lediglich bei 1020 °C (Kap. 4.1.4), was einer Reduzierung von fast 200 °C entspricht. Durch die signifikant geringere Austenitisierungstemperatur können ebenfalls Ressourcen eingespart werden. Das nachfolgende Anlassen findet bei einer ähnlichen Temperatur statt, sodass dieses nicht ins Gewicht fällt. Dadurch, dass die Wärmebehandlung des Stahls X153CrMoV12 (1.2379) ebenfalls in einem Schutzgasofen durchgeführt werden kann, liegt die mögliche Verzunderung der Materialoberfläche im selben Bereich wie beim Stahl HS6-5-2C (1.3343), sodass sich in der nachfolgenden Fertigungsroute keine weiteren Unterschiede ergeben (Kap. 5.1.3). Somit ergeben sich die Vorteile bei der verlängerten Standzeit, dem geringeren Ressourceneinsatz für den Werkstoff und teilweise geringeren Temperaturen in der Wärmebehandlung. Der Standard-Drehselmeißel aus 80CrV2 (1.2235) ist bewusst nicht mit in diesen Vergleich einbezogen worden. Da der Werkstoff keine ausreichende Anlassbeständigkeit aufweist (Kap. 5.4.2), erfüllt er eine Grundvoraussetzung der möglichen Materialanforderungsliste nicht, sodass dieser nicht berücksichtigt wird bei der Materialauswahl. Trotz des geringeren Energieverbrauchs für die Herstellung des Materials müsste aufgrund der reduzierten Standzeit eine signifikant höhere Anzahl an Drehselmeißeln hergestellt werden. Dieser energetische Mehraufwand ist alleine bei der Betrachtung der Materialenergie zu sehen und summiert sich auf, wenn die einzelnen Fertigungsschritte in die Betrachtung einbezogen werden.

Die Betrachtung an den vorliegenden Drehselmeißel zeigt, dass enormes Ressourcen-Einsparpotenzial bei der Produktentwicklung in der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie vorhanden ist. Neben der Auswahl an Werkstoffen, die die benötigten Energiemengen bei deren Herstellung und den nachfolgenden Fertigungsprozessen von Produkten reduzieren, kann eine optimale Anpassung der Werkstoffe an ein Produkt die Standzeit dieser signifikant erhöhen. Die Ergebnisse der Verschleißversuche haben gezeigt (Kap. 4.7), dass die Karbidausrichtung quer zur angreifenden Schneide eine längere Standzeit ermöglicht und somit eine intensivere Produktnutzung vorliegt. Andere Arbeiten zeigen, dass eine optimierte Wärmebehandlung die Verschleißbeständigkeit von Stählen verbessern kann [291, 292]. Ähnlich wie bei dem in Kapitel 5.2.1 diskutierten Nesting-Verfahren sind alle zu beachtenden Kriterien in der Materialauswahl ebenfalls ein multikriterielles Optimierungsproblem. Bei der Herstellung von metal-

lischen Produkten sind verschiedene technologische, ökonomische und ökologische Einflussfaktoren zu berücksichtigen, die teilweise in einem Konflikt zueinander stehen [293]. Hierzu sind gründliche Lebenszyklusanalysen bereits in der Produktentwicklung notwendig, die den Einfluss der Materialien, Fertigungsprozesse und deren Standzeit miteinbeziehen, sodass mithilfe von Algorithmen die nachhaltigste Lösung ausgewählt werden kann. Abschließend können folgende Aussagen zur Materialauswahl unter Berücksichtigung von Zielen der Circular Economy zusammengefasst werden:

- In etablierten Vorgehensweisen zur Materialauswahl werden in Materialanforderungslisten derzeit kaum Anforderungen an die Nachhaltigkeit gestellt.
- Die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsanforderungen bei der Materialauswahl kann bei der Herstellung der Materialien und bei der Produktherstellung Ressourcen einsparen. Darüber hinaus kann die Nutzung der Produkte durch verbesserte Produkteigenschaften intensiviert werden.
- In dem dargestellten Fallbeispiel der Drechselmeißel kann die Standzeit durch den Stahl X153CrMoV12 (1.2379) verdoppelt und der Ressourceneinsatz halbiert werden.
- Neben einem geänderten Material müssen auch die jeweiligen Materialeigenschaften berücksichtigt und optimiert werden, sodass die Nutzungszeit der Produkte weiter intensiviert werden kann.
- Die technologischen, ökonomischen und ökologischen Einflussfaktoren auf die Materialanforderungsliste stehen teilweise in einem Zielkonflikt zueinander.

5.6 Bewertung der Repurpose-Strategie auf die Umweltleistung

Der Einfluss der Repurpose-Strategie auf die Umweltleistung wurde in den vorherigen Kapitel bereits an der entsprechenden Position in der Wertschöpfungskette diskutiert. Hierzu zählen die Einflüsse des Sekundärmaterials auf die Fertigungsroute (Kap. 5.1.3) und auf den unterschiedlichen Lebenszyklus zwischen den konventionellen und den Repurpose-Werkzeugen (Kap. 5.3 und 5.4). In diesem Kapitel wird der Einfluss der gesamten Repurpose-Strategie auf die Umweltleistung bewertet. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Materialeffizienz betrachtet wird und keine vollumfängliche Lebenszyklusanalyse durchgeführt wird. In dieser Arbeit werden in der Betrachtung der Materialeffizienz für ein Produkt bzw. Werkzeug das bewusst hergestellte Material, die Materialverluste und die benötigten Energien während des Fertigungsprozesses sowie die Länge der Standzeit einbezogen.

Im Rahmen der konzipierten Repurpose-Strategie stehen verschlissene Maschinenkreismesser am Ende des Lebenszyklusses zur Verfügung. Sobald diese definierte Verschleißkennwerte erreicht haben (Kap. 5.1), werden diese derzeit im metallischen Mischschrott der jeweiligen Anwender entsorgt und

somit der Recycling-Strategie zugeführt [13]. Das Konzept der Kreislaufwirtschaft bietet neben dem Recycling auch andere Strategien, die auf eine höhere Materialeffizienz abzielen, was zur einer geringeren Stahlproduktion und Umweltbelastung führen könnte [294]. Gegenüber dem Recycling bieten die Strategien Remanufacturing und Repurposing eine höhere Materialeffizienz [13]. Um die Klimaziele zu erreichen, ist bekannt, dass eine Kombination aus Energie- und Materialeffizienzmaßnahmen in der Stahlindustrie notwendig ist [16, 295]. In Nachhaltigkeitsbewertungen wird die benötigte Energie für das Herstellen des Materials anteilig zu der Lebensdauer der Produkte berücksichtigt. Da die Maschinenkreismesser (Kap. 4.2.1) gegenüber den Handwerkzeugen mit mehreren Jahren eine geringe Lebensdauer aufweisen, müsste den Repurpose-Werkzeugen ein Großteil der Energie zur Herstellung des Materials angerechnet werden. Eine andere Möglichkeit wäre, dass die Wertschöpfung der Werkzeuge mit in die Betrachtung einfließt. Da die Maschinenkreismesser die gesamte Zeit ununterbrochen im Einsatz sind, ist der Anteil der Wertschöpfung zur Lebenszeit nahezu 100 %. Bei den Handwerkzeugen beträgt die Lebensdauer mehrere Jahre, wobei der Anteil der damit durchgeführten Wertschöpfung signifikant geringer ist. Hierdurch sind Ressourcen in Produkten gebunden, die wenig im Einsatz sind. Demnach muss der Anteil der Wertschöpfung zur Lebenszeit mit in Nachhaltigkeitsbewertungen einfließen. Durch die Rethink-Strategie kann der Nutzungsgrad von Produkten ebenfalls erhöht werden, da diese gemeinsam genutzt werden [13, 36]. Diese anteilige Betrachtung der Energiewerte für hergestellte Materialien sollte angewendet werden, wenn im Produktentwicklungsprozess von vorne herein berücksichtigt wird, die enthaltenen Baugruppen, Bauteile oder Materialien in anderen Strategien wiederzuverwenden. Da in dieser konzipierten Repurpose-Strategie allerdings das Sekundärmaterial aus dem Mischschrott vor dem Verarbeiten in der Recycling-Strategie bewahrt wird (Kap. 5.1), wird in dieser Arbeit den Repurpose-Produkten keine Energie für das Herstellen des Materials anteilig zugerechnet. Da für das Recyceln des Materials wieder viel Energie zum Einschmelzen, Gießen, Walzen und erneuter Wärmebehandlung benötigt wird, könnte diese eingesparte Energie sogar den Repurpose-Produkten gutgeschrieben werden, was jedoch aufgrund fehlender Daten nicht durchgeführt wird. Die Recycling-Strategie kann dahingehend verbessert werden, wenn Material sortenrein gesammelt und recycelt wird [40].

Demnach kann der Vergleich zwischen den konventionellen und den Repurpose-Werkzeugen gezogen werden, dass für die konventionellen metallischen Rohlinge Energie für das Herstellen des Materials benötigt wird, die Repurpose-Rohlinge jedoch neutral betrachtet werden. Für die Betrachtung wurde auf die Daten vom CES Selector zurückgegriffen, die in Tabelle 7 dargestellt sind [229]. Bei den konventionellen Werkzeugen wird das Material bewusst für die Werkzeuge hergestellt, sodass für eine Hakenklinge des Pappreißmessers 1,2 MJ (ca. 50 g des 75Cr1 (1.2003)), für ein Standard-Drehselmeißel 4,78 MJ (ca. 200 g des 80CrV2 (1.2235)) und für ein High-Performance-Drehselmeißel 17,52 MJ (ca. 170 g des HS6-5-2C (1.3343)) Energie verbraucht wird. Im Bezug auf die Daten aus Tabelle 7 fällt

auf, dass die Energiewerte für die Herstellung des Stahl 75Cr1 (1.2003) trotz der anderen chemischen Zusammensetzung (Tab. 8) dieselben sind wie für den Stahl 80CrV2 (1.2235) (Tab. 9). Daran wird deutlich, dass die Verfügbarkeit der Daten für eine korrekte Berechnung in der Stahlindustrie eingeschränkt sind. Auch aus diesem Grund schließen Umweltbewertungen die Differenzierung eines Metalls hinsichtlich seiner genauen chemischen Zusammensetzung der Einfachheit halber meistens aus [283, 284].

In Kapitel 5.1.3 ist der Einfluss des Sekundärmaterials auf die Fertigungsrouten der einzelnen Werkzeuge bereits diskutiert worden. Hierbei hat sich gezeigt, dass der Einfluss auf die Fertigungsroute je nach zu fertigendem Produkt variiert. Bei den Repurpose-Drehselmeißeln entfällt der hoch energetische Prozess der Wärmebehandlung, da diese zum Einstellen der Gebrauchseigenschaften bereits im ersten Lebenszyklus durchgeführt wurde (Kap. 5.1.3). Die Verschleißversuche haben gezeigt (Kap. 5.4), dass die Materialeigenschaften nicht durch eine erneute Wärmebehandlung angepasst werden müssen. Des Weiteren konnte beim Schleifprozess die Materialeffizienz erhöht werden, da deutlich weniger Material abgetragen werden muss (Kap. 5.1.3). Hierbei ändert sich der Einfluss aufgrund der unterschiedlichen Wärmebehandlungen zwischen dem Standard-Drehselmeißel und dem High-Performance-Drehselmeißel. Es konnte aber auch gezeigt werden, dass die Verwendung des Sekundärmaterials keinen oder sogar einen negativen Einfluss auf die Fertigungsroute haben kann, wie es beim Pappreißmesser der Fall ist. Durch das verschleißbeständigere Sekundärmaterial wird der Schleifaufwand signifikant erhöht und durch die geänderte Geometrie der Hakenklinge wird die anschließende Griffmontage komplexer. Eine vollumfängliche Lebenszyklus-Analyse ist im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt worden. Hierzu ist die Erfassung aller eingehenden und ausgehenden Material- und Energieströme notwendig, was den Rahmen dieser Arbeit übersteigt.

Um den gesamten Einfluss der Repurpose-Strategie auf die Umweltleistung zu beurteilen, müssen die benötigten Energien für die Herstellung des Materials, mit denen der Fertigungsprozesse addiert und mit dem Faktor der Standzeit multipliziert werden. Da beim Schleifen die Energiewerte für das konventionelle und das Repurpose-Pappreißmesser nahezu identisch sind (Kap. 5.1.3), ist der entscheidende Faktor das nicht bewusst hergestellte Sekundärmaterial bzw. die zuvor genannten Energiewerte. Bedingt durch die bessere Standzeit der Repurpose-Pappreißmesser mit einer parallelen Ausrichtung zur Karbidzeiligkeit (Kap. 5.3.3) wird der Energiewert für ein konventionelles Pappreißmesser mit dem Faktor sechs der Standzeit multipliziert. Hierdurch ergeben sich für sechs konventionelle Pappreißmesser eine aufgewendete Energie von ca. 7,2 MJ. Für das Repurpose-Pappreißmesser wird nur die Energiemenge für das Schleifen in Höhe von 90,83 kJ benötigt (Tab. 4.10.3), da wie bereits erwähnt dem Sekundärmaterial keine Energie zugerechnet wird. Bei den Drehselmeißeln fällt die Differenz signifikant höher aus, obwohl der Faktor der Standzeit geringer ist (Kap. 4.7.2). Ausschlaggebend ist die hohe Masse der Drehselmeißel und der Materialabtrag während des Schleifprozesses (Tab. 30). Der En-

ergieaufwand für vier Standard-Drechselmeißel beträgt 27,8 MJ. Demgegenüber steht ein Repurpose-Drechselmeißel, bei dem für das Schleifen 249 kJ verbraucht wird. Die höchste Differenz weist die benötigte Energie der Drechselmeißel auf. Diese beträgt für zwei High-Performance-Drechselmeißel 37,52 MJ gegenüber den 249 kJ des Repurpose-Drechselmeißels. Bei dem aufgezeigten Vergleich der Drechselmeißel ist jedoch zu berücksichtigen, dass lediglich das eingesetzte Material mit dem Schleifprozess verglichen worden ist. Berücksichtigt wurde nicht, dass bei der Herstellung der Repurpose-Drechselmeißel die energieintensive Wärmebehandlung entfällt (Kap. 5.1.3). Hierdurch ergeben sich deutlich höhere Einsparungen bei der benötigten Energie.

Die in Kapitel 5.2 diskutierten Optimierungen des Nesting-Verfahrens oder des Laserschneidprozesses sind ebenfalls nicht in die zuvor genannten Werten eingegangen. Hierdurch kann die Energie- und Materialeffizienz der Repurpose-Strategie weiter gesteigert werden (Kap. 4.10.1 und 4.10.2). Die Ergebnisse des dreidimensionalen Nesting-Verfahrens mit zusätzlichen Nebenbedingungen haben gezeigt, dass die Berücksichtigung von ökologischen Aspekten der nachfolgenden Fertigungsverfahren signifikanten Einfluss auf die Materialeffizienz der Repurpose-Strategie hat. Weiter ist zu überlegen, ob die Ausrichtung der Karbidzeiligkeit als Nebenbedingung berücksichtigt werden muss. Die Ergebnisse der Verschleißversuche der Repurpose-Werkzeuge haben gezeigt, dass die Karbidausrichtung quer zur Schneide eine höhere Verschleißbeständigkeit und somit eine höhere Standzeit ermöglicht (Kap. 4.7). Jedoch weisen beide Karbidausrichtungen eine höhere Verschleißbeständigkeit auf als die konventionellen Werkzeuge. Hier ist zu überlegen, ob die Karbidausrichtung quer zur Schneide unberücksichtigt bleibt, sodass bei dem Nesting-Verfahren der Output an Repurpose-Rohlingen weiter gesteigert werden kann. Hierbei sollte jedoch nicht die Minimierung der benötigten Energie außer Acht gelassen werden (Kap. 5.2.1) [296]. Hier ist ebenfalls erneut ein Umdenken der Anwender notwendig, dass die Repurpose-Werkzeuge möglicherweise unterschiedliche Standzeiten aufweisen können [261, 262]. Neben dem möglichen höheren Ausnutzungsgrad hat die Vernachlässigung der Karbidzeiligkeit eine Vereinfachung der Rohlingentnahme zur Folge. Wenn die Karbidzeiligkeit berücksichtigt werden muss, muss diese für jede Ronde durch das in Kapitel 4.4 entwickelte ambulante Metallographie-Verfahren identifiziert werden. Hierbei hat sich gezeigt, dass eine Oberflächenqualität nach dem Schleifen mit P1500 Mesh SiC-Schleifpapier (10 µm) und anschließend siebenminütigem Ätzen mit V2A-Beize oder HNO₃ ausreicht, um anschließend mittels Acetatfolie einen Negativabdruck der Karbide zu nehmen [58]. Dieser kann anschließend unter einem Auflichtmikroskop betrachtet werden und die Karbidzeiligkeit wird auf die Maschinenkreismesser übertragen. Trotz der vermeintlich simplen Methode der ambulanten Metallografie vereinfacht die Vernachlässigung der Karbidzeiligkeit die Entnahme der Rohlinge signifikant. Abschließend können folgende Aussagen zum Einfluss der Repurpose-Strategie auf die Umweltleistung zusammengefasst werden:

- Die konzipierte Repurpose-Strategie verbessert die Energie- und Materialeffizienz in allen Bereichen der Wertschöpfungskette.
- Die Verarbeitung des Sekundärmaterials in der Recycling-Strategie wird durch die konzipierte Repurpose-Strategie herausgezögert, sodass diesem kein anteiliger Energiewert zugerechnet wird und dieses neutral in die Berechnung einfließt.
- Die Optimierung von bestehenden Fertigungstechnologien der Linearwirtschaft kann die Energie- und Materialeffizienz der Repurpose-Strategie weiter steigern.
- Die Vernachlässigung der Karbidzeitigkeit kann den Ausnutzungsgrad des Sekundärmaterials möglicherweise erhöhen, was eine nicht einheitliche Qualität der Repurpose-Werkzeuge zur Folge hätte.
- Das Berücksichtigen eines großen Repurpose-Produktportfolios kann den Ausnutzungsgrad darüber hinaus steigern, sodass möglichst viel Sekundärmaterial in der Repurpose-Strategie verarbeitet wird.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, ein Circular Economy Konzept in der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie zu entwickeln. Die Konzeptionierung erfolgte unter Betrachtung und Berücksichtigung von fertigungs- und werkstofftechnischen Aspekten sowie Randbedingungen. Als Sekundärmaterial für das Circular Economy Konzept standen verschlissene Maschinenkreismesser aus der Hygienepapierindustrie zur Verfügung. Diese Maschinenkreismesser werden aus dem hochlegierten Kaltarbeitsstahl X153CrMoV12 (1.2379) hergestellt. Für die Herstellung des Stahls wird aufgrund der zum Teil in hohen Mengen enthaltenen kritischen Legierungselemente viel Energie benötigt. Neben der energieintensiven Herstellung des Stahls wird für die Weiterverarbeitung zu Maschinenkreismessern weitere Energie benötigt. Für das Einstellen der Materialeigenschaften wird eine Wärmebehandlung, die aus Härten und mehrmaligem Anlassen besteht, durchgeführt. Nach der Wärmebehandlung folgen mehrere Schleifprozesse, die aufgrund des verschleißbeständigen Materials ebenfalls energieintensiv sind. Bei diesen Schleifprozessen fällt darüber hinaus eine signifikante Menge an Schleifschlamm an, der unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit zu vermeiden bzw. zu minimieren ist. Die verschlissenen Maschinenkreismesser werden derzeit nach dem Einsatz im Mischschrott entsorgt und der Recycling-Strategie zugeführt. Für eine verbesserte Energie- und Materialeffizienz der Recycling-Strategie müssen die verschlissenen Maschinenkreismesser sortenrein gesammelt und recycelt werden. Durch das sortenreine Recycling von Stahlschrott werden die chemischen Zusammensetzungen von Legierungen nicht verunreinigt, sodass diese eingeschmolzen und erneut als Halbzeug hergestellt werden können.

Neben der Recycling-Strategie können weitere Strategien eine höhere Energie- und Materialeffizienz aufweisen. Eine davon ist die Repurpose-Strategie, bei der Baugruppen, Bauteile oder Materialien in neuen Produkten mit geänderter Funktion wiederverwendet werden sollen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Repurpose-Strategie ausgewählt, um die Nutzung des hochlegierten Kaltarbeitsstahls X153CrMoV12 (1.2379), aus dem die Maschinenkreismesser hergestellt werden, zu intensivieren. Neben dem Ziel, das Sekundärmaterial weiterzuverwenden, soll die dafür aufgewendete Energie minimal gehalten werden. Bei der Konzipierung der Repurpose-Strategie wurde im Rahmen dieser Arbeit der gesamte Wertschöpfungsprozess betrachtet. Dieser beinhaltet die Auswahl geeigneter

Repurpose-Produkte, die Möglichkeit, Rohlinge aus den verschlissenen Maschinenkreismessern auszuschneiden, sodass Rohlinge aus dem vorhandenen Sekundärmaterial für andere Produkte zur Verfügung stehen. Des Weiteren wurde der Einfluss des Sekundärmaterials auf die bestehenden Fertigungsrouuten und auf die Gebrauchseigenschaften der Repurpose-Werkzeuge betrachtet.

In einer Linearwirtschaft ist die Materialauswahl im Konstruktionsprozess integriert. Dieser ist wiederum in der Produktentwicklung integriert. Für die Materialauswahl werden Materialanforderungslisten erstellt. Anhand der Materialanforderungen kann jedes zur Verfügung stehende Material ausgewählt oder speziell für die Anforderungen entwickelt werden. In einer Kreislaufwirtschaft bzw. bei der in dieser Arbeit konzipierten Repurpose-Strategie stand Sekundärmaterial zur Verfügung, das bereits für den ersten Lebenszyklus eingestellte Materialeigenschaften aufweist. Aus diesem Grund müssen in einer Repurpose-Strategie die Produkte anhand der bestehenden Materialeigenschaften ausgewählt werden. Eine Anpassung der Materialeigenschaften wäre zwar möglich, ist durch den hohen Energieeintrag jedoch nicht im Sinne der 10R-Strategieziele. Das vorliegende Sekundärmaterial ist ein verschleißbeständiger Kaltarbeitsstahl mit der Bezeichnung X153CrMoV12 (1.2379), der beispielsweise für Schneidwaren eingesetzt wird. Durch seine spröden Werkstoffeigenschaften können aus dem Stahl X153CrMoV12 (1.2379) keine Werkzeuge mit schlagender Beanspruchung hergestellt werden. Da der Stahl bei der Fertigung der Maschinenkreismesser im Sekundärhärtemaximum bei ca. 520 °C angelassen wird, können die Einsatztemperaturen der möglichen Repurpose-Werkzeuge bis zu dieser Temperatur gehen. Neben den Materialeigenschaften des Sekundärmaterials sind dessen Abmessungen und die der Repurpose-Werkzeuge entscheidend. Der Flanschbereich des verschlissenen Maschinenkreismessers weist eine einheitliche Materialstärke auf, wohingegen die Materialstärke im Watebereich abnimmt. Diese reduziert sich von der Materialstärke im Flanschbereich auf nahezu 0 mm an der Schneide. Der Flanschbereich eignet sich aufgrund der abnehmenden Materialstärke für händisch geführte Schneidware, sodass aus diesem Bereich Rohlinge für Hakenklingen entnommen wurden. Diese Hakenklingen werden für die Herstellung von Pappreißmessern benötigt, mit denen Bitumenbahnen geschnitten werden. Aus dem Flanschbereich mit einheitlicher Materialstärke wurden Rohlinge für Drechselmeißel entnommen, da der Werkzeugstahl X153CrMoV12 (1.2379) eine Anlassbeständigkeit bis 520 °C aufweist. Da derzeit nur Datenbanken mit Materialeigenschaften zur Materialauswahl existieren, müssen für eine Kreislaufwirtschaft auch Produktdatenbanken mit Anforderungen an die Materialien erstellt werden. Hierdurch können Unternehmen die Materialeigenschaften der Sekundärmaterialien eintragen und automatisiert Vorschläge für mögliche Repurpose-Produkte erhalten bzw. mit anderen Unternehmen Kontakt aufnehmen, die das Sekundärmaterial verarbeiten können. Hierbei gilt es zu erforschen, wie diese Datenbanken entwickelt werden können, da ein Aspekt die Weitergabe des Know-Hows der jeweiligen Unternehmen sein kann.

Für die Entnahme der Rohlinge aus den verschlissenen Maschinenkreismessern mussten geeignete

trennende Fertigungsverfahren gewählt werden. Dieses Verfahren musste in der Lage sein, aus 5 mm dickem gehärtetem Werkzeugstahl Rohlinge mit einer definierten Kontur zu entnehmen. Diese Anforderungen erfüllten lediglich das (Abrasive-)Wasserstrahl-, Laser-, Plasma- oder Brennschneiden. Für das Feinschneiden existieren derzeit keine Maschinen auf dem Markt, die die benötigte Schnittkräfte aufbringen können. Neben der fehlenden Schnittkraft ist die Sprödigkeit des X153CrMoV12 (1.2379) ein weiterer Faktor, da die Rohlinge beim Feinschneiden brechen könnten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Verfahren Wasserstrahl- und Laserschneiden ausgewählt und miteinander verglichen. Hierbei hat sich gezeigt, dass beim Wasserstrahlschneiden die verschlissenen Maschinenkreismesser entlang der Spannungswalzringe brechen und somit die Entnahme der Rohlinge nicht möglich ist. Aufgrund der abnehmenden Materialstärke im Watebereich liegt das verschlissene Maschinenkreismesser in diesem Bereich nicht durchgängig auf dem Maschinenbett auf. In der Literatur gilt das Wasserstrahlschneiden als spannungsfreies trennendes Fertigungsverfahren, was im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht der Fall war. Aufgrund des Wirkprinzips vom Wasserstrahlschneiden und der vorliegenden Geometrie des Maschinenkreismessers wird zusätzliche Biegespannung induziert. Die zusätzlichen Spannungen überlagern sich mit den bereits vorliegenden Spannungen in den eingebrachten Walzringen, sodass eine kritische Spannung überschritten wird und es zum Bruch kommt. Hierdurch ist die Entnahme von Rohlingen für Repurpose-Werkzeuge im Watebereich nicht möglich. Die Verwendung von Vorrichtungen, auf denen die verschlissenen Maschinenkreismesser aufliegen, sodass die eingebrachte Biegespannung reduziert wird, könnte die Entnahme von Rohlingen durch Wasserstrahlabrasivschneiden im Watebereich ermöglichen. Hierdurch wird der notwendige Aufwand in der Repurpose-Strategie jedoch gesteigert.

Die Entnahme von Rohlingen durch Laserschneiden war uneingeschränkt möglich. Beim Laserschneiden bildet sich jedoch die verfahrenstypische Wärmeeinflusszone aus, die zu unerwünschten Materialeigenschaften führt. Die Wärmeeinflusszone kann zum Teil plötzliches Werkzeugversagen begünstigen. Hierdurch muss bei den lasergeschnittenen Rohlingen die Wärmeeinflusszone weggeschliffen werden, was zu unerwünschtem Materialabtrag und Schleifschlamm führt. Da derzeitige Fertigungstechnologien in einer Linearwirtschaft für gängige, einheitliche Blechtafeln ausgelegt sind, mussten die Laserschneidparameter für die dickste Materialstärke ausgewählt werden. Versuche haben gezeigt, dass die Wärmeeinflusszone mit abnehmender Materialstärke ansteigt. Hierdurch steigt der nötige Materialabtrag ebenfalls an, was nicht den Zielen der 10R-Strategien entspricht. Um den Einfluss einer In-Situ Laserschneidsteuerung zu analysieren, wurden Versuche mit Laserschneidparametern für entsprechende Materialstärken durchgeführt. Gezeigt werden konnte, dass sich der Materialabtrag um bis zu 50 Prozent mit angepassten Parametern verringert. Neben einem geringeren Materialabtrag konnte darüber hinaus die benötigte Zeit, die für einen Rohling benötigt wird, um 25 Prozent reduziert werden. Demnach ist es wichtig, dass trennende Fertigungsverfahren

für die Verwendung von Sekundärmaterial im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft angepasst werden. Sekundärmaterialien können keine standardisierten Abmaße aufweisen, sodass die Fertigungstechnologien für die Verarbeitung angepasst und optimiert werden müssen.

Die Rohlinge für die Repurpose-Werkzeuge sind nach der Entnahme aus den verschlissenen Maschinenkreismessern in die Produktion der konventionellen Werkzeuge integriert worden. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Verwendung von Sekundärmaterial positiven und negativen Einfluss auf die Fertigungsrouuten der Werkzeuge hat. Die Repurpose-Pappreißmesser durchlaufen dieselben Produktionsschritte wie die konventionell hergestellten Pappreißmesser. Die Rohlinge werden in beiden Fertigungsrouuten durch Laserschneiden ausgeschnitten. Anschließend wird die Schneide geschliffen und abschließend erfolgt die Montage des Holzgriffes. Bedingt durch das verschleißbeständigere Sekundärmaterial nimmt die benötigte Energie für den Schleifprozess trotz des nahezu identischen Materialabtrags bei der konventionellen und der Repurpose-Hakenklinge zu. Neben der höheren Energie während des Schleifprozesses nimmt die Komplexität der Griffmontage zu. Je nach Entnahmeposition der Rohlinge aus dem verschlissenen Maschinenkreismesser variiert die Materialstärke an der Griffaufnahme, sodass diese nicht einheitlich vorbereitet werden können. Auf die Fertigungsroute der Drechselmeißel hat das Verwenden der Repurpose-Rohlinge positiven Einfluss. Die Rohlinge der Drechselmeißel werden in der konventionellen Fertigungsroute ebenfalls durch Laserschneiden aus Blechtafeln entnommen. Anschließend durchlaufen die Rohlinge eine Wärmebehandlung zum Einstellen der benötigten Materialanforderungen. Die Repurpose-Rohlinge hingegen müssen keine Wärmebehandlung durchlaufen, da die Materialeigenschaften bereits für den ersten Lebenszyklus eingestellt worden sind. Der anschließende Richtprozess kann bei den Repurpose-Drechselmeißeln ebenfalls entfallen, da durch die fehlende Wärmebehandlung kein thermischer Verzug vorliegt. Bei den Schleifprozessen reduziert sich der Materialabtrag signifikant gegenüber den konventionellen Drechselmeißeln. Die Reduzierung beträgt bis zu 90 Prozent gegenüber den Standard-Drechselmeißeln. Dieser Unterschied ist auf die verzünderte Oberfläche durch die durchgeführten Wärmebehandlungen zurückzuführen. Bei den Repurpose-Drechselmeißeln muss lediglich die Schneide geschliffen werden, da die restliche Oberfläche bereits geeignete Oberflächenqualitäten aufweist.

Um den Einfluss des Sekundärmaterials auf die Gebrauchseigenschaften der Werkzeuge zu analysieren, sind die Repurpose-Werkzeuge gegen die konventionellen Werkzeuge in Verschleißtests miteinander verglichen worden. Die Versuche haben gezeigt, dass sowohl bei Anwendungen unter Raumtemperatur als auch bei erhöhten Temperaturen die Standzeiten der Werkzeuge signifikant verlängert werden konnte. Der Stahl X153CrMoV12 (1.2379) weist gegenüber dem 75Cr1 (1.2003) der konventionellen Hakenklinge eine deutlich höhere Verschleißbeständigkeit auf, sodass die Standzeit um den Faktor sechs erhöht werden kann. Bei den Drechselmeißeln ist zu sehen, dass gegenüber dem Standard-Drechselmeißel die Verschleißbeständigkeit aufgrund der enthaltenen Hartphasen und

der höheren Anlassbeständigkeit des Sekundärmaterials um den Faktor vier erhöht wird. Gegenüber dem High-Performance-Drehselmeißel aus dem Schnellarbeitsstahl HS6-5-2C (1.3343) weisen die Repurpose-Drehselmeißel eine um den Faktor zwei verbesserte Standzeit auf. Dies ist auf die größeren Hartphasen vom Typ M_7C_3 im Stahl X153CrMoV12 (1.2379) zurückzuführen.

Neben der verbesserten Standzeit gegenüber den konventionellen Werkzeugen konnte gezeigt werden, dass die im Stahl X153CrMoV12 (1.2379) vorliegende Karbidzeiligkeit Einfluss auf die Materialeigenschaften des Stahls und auf das Verschleißverhalten der Repurpose-Werkzeuge hat. Hierbei hat sich die Karbidzeiligkeit senkrecht zur angreifenden Schneide als vorteilhaft gezeigt, da der Materialabtrag bei den Verschleißversuchen geringer war gegenüber der Karbidzeiligkeit entlang der Schneide. Die höhere Verschleißbeständigkeit der Karbidausrichtung quer zur angreifenden Schneide ist auf die bessere Einbettung der Karbide in die Matrix zurückzuführen. Die Erkenntnisse aus den Verschleißversuchen konnten in den standardisierten Einzelritzversuchen bestätigt werden. Die erhobenen Ergebnisse müssen in ausgiebigen Feldversuchen der Repurpose-Werkzeuge bestätigt werden. Neben der erhöhten Standzeit durch die bessere Hartphaseneinbindung an der angreifenden Schneide konnte darüber hinaus festgestellt werden, dass die Karbidzeiligkeit einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit aufweist. Durch die verbesserte Wärmeleitfähigkeit innerhalb der Werkzeuge kann die Wärme an der Schneide besser abgeführt werden, was ebenfalls die Standzeit der Drehselmeißel verbessert. Die Ergebnisse aus den Verschleißversuchen konnten ebenfalls anhand von Wärmeleitfähigkeitsmessungen bestätigt werden. Liegt die Karbidzeiligkeit parallel zum Wärmestrom, kann dieser besser durch das gesamte Werkzeug abgeführt werden. Eine zum Wärmestrom senkrechte Karbidzeiligkeit wirkt als Barriere für diesen und somit wird die Wärme an der Schneide gestaut.

Neben dem für die Repurpose-Strategie optimierten Laserschneidprozess konnte im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden, dass aktuelle Nestingverfahren ebenfalls für die 10R-Strategien angepasst werden müssen, da diese nur für eine Linearwirtschaft ausgelegt sind. Derzeitige Nestingverfahren werden in Input-Minimierungs- und Output-Maximierungsverfahren unterschieden. Bei diesen Verfahren kann die Anordnung durch Nebenbedingungen die Anordnung in Abhängigkeit von Qualitätskriterien beeinflussen. Die Berücksichtigung von Nebenbedingungen, die die Anordnungen mit den Zielen der 10R-Strategie beeinflussen, findet derzeit keine Anwendung bei bestehenden Nestingverfahren. Darüber hinaus gibt es derzeit keine dreidimensionalen Schneidprobleme, die für die Einführung von 10R-Strategien benötigt werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit haben gezeigt, dass für die Einführung einer Repurpose-Strategie in der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie dreidimensionale Schneidprobleme mit Nebenbedingungen, die die Ziele der 10R-Strategien verfolgen, wichtig sind, um die Repurpose-Strategie effizient umzusetzen. Durch die optimierte Anordnung konnte gezeigt werden, dass bis zu 41 Prozent Energie bei der weiteren Verarbeitung derselben Anzahl an Repurpose-Rohlingen eingespart werden konnte. Durch das Anpassen von dreidimensionalen

Schneidproblemen für die Einführung von 10R-Strategien bzw. einer Repurpose-Strategie ist es wichtig, dass Nestingverfahren Nebenbedingungen für die Minimierung von Energien berücksichtigt werden. Für eine weitere Effizienzsteigerung müssen neben den Rohlingen für die Hakenklingen und Drechselmeißeln weitere Werkzeuge identifiziert werden, für die aus den verschlissenen Maschinenkreismessern Rohlinge entnommen werden können. Hierbei müssen verschiedene Dimensionen berücksichtigt werden, sodass möglichst viel Material aus dem verschlissenen Maschinenkreismesser ausgeschnitten werden kann.

Die in dieser Arbeit erhobenen Ergebnisse können auch in einer Linearwirtschaft zur Effizienzsteigerung genutzt werden. Die Ergebnisse der Verschleißversuche haben gezeigt, dass die Drechselmeißel aus dem Kaltarbeitsstahl X153CrMoV12 (1.2379) eine höhere Standzeit gegenüber den High-Performance-Drechselmeißeln aus HS6-5-2C (1.3343) aufweisen. Der Schnellarbeitsstahl benötigt aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung deutlich mehr Energie bei der Herstellung und der Verarbeitung. Bei Produktentwicklungsprozessen müssen in der Materialauswahl die möglichen Standzeiten und die benötigte Energie für die Herstellung der Materialien berücksichtigt werden. Dieses Vorgehen ist ebenfalls Teil der 10R-Strategien, da die Nutzung von Materialien intensiviert wird und die Energie bei der Herstellung gleichsam minimiert. Auch die gezielte Nutzung der Karbidzeiligkeit von Werkzeugstählen kann in der Linearwirtschaft genutzt werden. Hierdurch kann die Standzeit von Werkzeugen verlängert werden.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Verwendung von Sekundärmaterial positive Auswirkung in der Werkzeug- und Schneidwarenindustrie hat. Es konnten fertigungs- und werkstofftechnische Herausforderungen aufgezeigt und Lösungen hierfür erarbeitet werden. Die fertigungstechnischen Lösungen müssen in einem nächsten Schritt in die Praxis überführt werden. Hierzu müssen Nestingverfahren mit erweiterten Nebenbedingungen programmiert werden, die eine Vielzahl an möglichen Repurpose-Produkten berücksichtigen, sodass die Materialausnutzung maximiert und die Energie minimiert wird. Für das effiziente Ausschneiden der Repurpose-Rohlinge müssen die Laserschneidanlagen technisch erweitert werden, sodass die Laserschneidparameter kontinuierlich auf die vorliegende Materialstärke angepasst werden kann.

Neben den fertigungs- und werkstofftechnischen Herausforderungen müssen darüber hinaus Geschäftsmodelle ausgewählt bzw. entwickelt werden, die es ermöglichen, die 10R-Strategie wirtschaftlich umzusetzen. In die Überlegungen müssen neben der Verkaufs- oder Leasingstrategie der Maschinenkreismesser ebenfalls die logistischen Herausforderungen miteinbezogen werden. Hierbei muss die Rückholung bzw. der Transport zu Produktionsstätten der Repurpose-Produkte geplant werden. Die in dieser Arbeit aufgestellte Betrachtung der Auswirkung auf die Umweltleistung muss darüber hinaus in einer vollumfänglichen Nachhaltigkeitsbewertung durchgeführt werden. Hierfür muss die Datenlage über Stähle und deren Legierungselemente zusätzlich verbessert werden. In diese Betrachtung müssen

die Transportwege der Maschinenkreismesser miteinbezogen werden, da diese signifikanten Einfluss auf die Bewertung haben. Um die Transportwege so gering wie möglich zu halten, müssen lokale Verbraucher für Sekundärmaterialien gefunden werden. Hierzu bedarf es einer digitalen Lösung, die Sekundärmaterialeigenschaften mit Produktanforderungen abgleicht und somit das Potenzial aufzeigen kann.

Tabellen

Tabelle 1: Auflistung der einzelnen Versuchsfelder für die Vor-Ort-Metallographie mit der präparierten Oberflächenbeschaffenheit, dem verwendeten Ätzmittel und der durchgeführten Ätzdauer.

| Versuchsfeld | Behandlungszustand | Ätzmittel | Ätzdauer |
|--------------|--------------------|---------------|----------|
| 1 | unbehandelt | V2A-Beize | 2 min. |
| 2 | unbehandelt | Salpetersäure | 2 min. |
| 3 | unbehandelt | V2A-Beize | 7 min. |
| 4 | unbehandelt | Salpetersäure | 7 min. |
| 5 | P500 | V2A-Beize | 2 min. |
| 6 | P500 | Salpetersäure | 2 min. |
| 7 | P500 | V2A-Beize | 7 min. |
| 8 | P500 | Salpetersäure | 7 min. |
| 9 | P1500 | V2A-Beize | 2 min. |
| 10 | P1500 | Salpetersäure | 2 min. |
| 11 | P1500 | V2A-Beize | 7 min. |
| 12 | P1500 | Salpetersäure | 7 min. |
| 13 | 6 μm | V2A-Beize | 2 min. |
| 14 | 6 μm | Salpetersäure | 2 min. |
| 15 | 6 μm | V2A-Beize | 7 min. |
| 16 | 6 μm | Salpetersäure | 7 min. |
| 17 | 1 μm | V2A-Beize | 2 min. |
| 18 | 1 μm | Salpetersäure | 2 min. |
| 19 | 1 μm | V2A-Beize | 7 min. |
| 20 | 1 μm | Salpetersäure | 7 min. |

Tabelle 2: Fertigungsparameter der Materialkarten für den Kaltarbeitsstahl X153CrMoV12 (1.2379) der Laserschneidanlage „Trumpf TLF 3800 turbo“ für das Laserschneiden von Proben und Halbzeugen bei unterschiedlichen Materialstärken.

| Materialstärke: [mm] | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
|---|------|------|------|------|------|
| Laserleistung: [W] | 3000 | 3500 | 3800 | 3800 | 3800 |
| Schneidgeschwindigkeit: [mm min ⁻¹] | 3000 | 2500 | 1500 | 1200 | 900 |
| Düsenabstand: [mm] | 0,7 | 0,7 | 0,9 | 1,0 | 1,2 |
| Gasdruck: [bar] | 14 | 15 | 16 | 18 | 20 |

Tabelle 3: Eingestellte Parameter für die Vermessung der Eigenspannungen über die Spannungswalzringe der Maschinenkreismesser.

| Messparameter | | | | | |
|----------------------------|-----------------------|----------------|-----------|------------------------------|----------|
| Kollimator- durchmesser | Bestrahlungs- zeit | Arbeitsabstand | Strahlung | Beschleunigungs- spannung | Winkel 0 |
| [mm] | [s] | [mm] | | [kV] | [Grad] |
| 0,3 | 110 | 39 | CrK | 30 | 35 |
| 2 | 10 | | | | |
| Auswertparameter | | | | | |
| | s1 | 1/2s2 | E-Modul | Gitterparameter | |
| | [GPa] | [GPa-1] | [GPa] | [Å] | |
| | 1,43 | 6,19 | 210 | 2,87 | |

Tabelle 4: Einstellungen des Punktschweißgerätes vom Typ Spot Welding Fixture 9061 für das Punktschweißen der Thermoelemente auf die Drechselmeißel.

| | Stromstärke in [A] | Zeit in [s] |
|--------|--------------------|-------------|
| 1.2235 | 6 | 4,5 |
| 1.3334 | 5 | 5 |
| 1.2379 | 6 | 4 |

Tabelle 5: Anlasstemperatur für die Erstellung eines Härteanlassdiagrammes des 80CrV2 (12235) und die gemessenen Härtewerten in HV5.

| Anlasstemperatur in °C | HV 5 (gemittelt) | Standardabweichung (HV5) |
|---------------------------|---------------------|-----------------------------|
| 200 | 704 | 9,85 |
| 220 | 688 | 10,03 |
| 240 | 686 | 7,8 |
| 260 | 661 | 7,87 |
| 280 | 647 | 10,89 |
| 300 | 622 | 9,51 |
| 350 | 553 | 3,45 |
| 400 | 511 | 3,46 |
| 500 | 396 | 6,45 |

Tabelle 6: Parametereinstellungen des Schneidleistungstests der Hakenklinge durchgeführt an der Universalprüfmaschine der Firma Zwick vom Typ Z050.

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Vorkraft | 2 N |
| Schnittlänge pro Zyklus | 20 mm |
| Prüfgeschwindigkeit | 3 mm/s |
| Obere Grenze der Traverse | 524 mm |
| Untere Grenze der Traverse | 287 mm |
| Gesamter Verfahrensweg der Traverse | 237 mm |

Tabelle 7: Primäre Produktionsenergie und Verarbeitungsenergie der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Werkstoffe aus der Datenbank CES Selector. [229]

| Werkstoff | Primär Energie | Recycling Energie | Produktionsmix | Gießen | Walzen | Schleifen |
|----------------------|----------------|-------------------|----------------|--------|--------|-----------|
| 75Cr1 (1.2003) | 33,90 | 8,96 | 23,92 | 11,90 | 16,30 | 47,80 |
| 80CrV2 (1.2235) | 33,90 | 8,96 | 23,92 | 12,00 | 16,30 | 48,40 |
| HS6-5-2C (1.3343) | 153,00 | 28,20 | 103,08 | 11,60 | 18,90 | 56,40 |
| X153CrMoV12 (1.2379) | 60,70 | 13,90 | 41,98 | 12,00 | 19,10 | 56,80 |

Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung des niedriglegierten Kaltarbeitsstahl 75Cr1 (1.2003) nach DIN EN 10132:2022-04 [231] und mittels OES gemessene chemische Zusammensetzung. Alle Angaben in Ma.-%.

| | | C | Si | Mn | Cr | Fe |
|------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| Norm | Min. | 0,70 | 0,25 | 0,65 | 0,30 | Rest |
| | Max. | 0,80 | 0,50 | 0,80 | 0,40 | |
| OES | | 0,72 ± 0,01 | 0,29 ± 0,05 | 0,75 ± 0,04 | 0,37 ± 0,02 | Rest |

Tabelle 9: Chemische Zusammensetzung des Stahls 80CrV2 (1.2235) nach DIN EN 10132:2022-04 [231] und mittels OES gemessene chemische Zusammensetzung. Alle Angaben in Ma.-%.

| | | C | Si | Mn | Cr | Mo | Ni | V | Fe |
|------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| Norm | Min. | 0,75 | 0,15 | 0,30 | 0,40 | - | - | 0,15 | Rest |
| | Max. | 0,85 | 0,35 | 0,50 | 0,60 | 0,10 | 0,40 | 0,25 | |
| OES | | 0,78 ± 0,02 | 0,23 ± 0,08 | 0,58 ± 0,04 | 0,42 ± 0,02 | 0,04 ± 0,01 | 0,12 ± 0,05 | 0,12 ± 0,02 | Rest |

Tabelle 10: Chemische Zusammensetzung des Stahls HS6-5-2C (1.3343) nach DIN EN ISO 4957:2018-11 und mittels OES gemessene chemische Zusammensetzung. Alle Angaben in Ma.-%.

| | | C | Si | Mn | Cr | Mo | W | V | Fe |
|------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
| Norm | Min. | 0,86 | - | - | 3,80 | 5,90 | 5,90 | 1,70 | Rest |
| | Max. | 0,94 | 0,45 | 0,40 | 4,50 | 5,20 | 6,70 | 2,10 | |
| OES | | 0,79 ± 0,02 | 0,33 ± 0,01 | 0,34 ± 0,01 | 3,84 ± 0,02 | 4,66 ± 0,02 | 6,28 ± 0,03 | 1,82 ± 0,01 | Rest |

Tabelle 11: Chemische Zusammensetzung des Stahls X155CrMoV12 (1.2379) nach DIN EN ISO 4957:2018-11 [49] und mittels OES gemessene chemische Zusammensetzung. Alle Angaben in Ma.-%.

| | | C | Si | Mn | Cr | Mo | V | Fe |
|------|------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|------|
| Norm | Min. | 1,45 | 0,10 | 0,20 | 11,00 | 0,70 | 0,70 | Rest |
| | Max. | 1,60 | 0,60 | 0,60 | 13,00 | 1,00 | 1,00 | |
| OES | | 1,52 ± 0,07 | 0,35 ± 0,03 | 0,43 ± 0,01 | 11,44 ± 0,12 | 0,68 ± 0,13 | 0,73 ± 0,09 | Rest |

Tabelle 12: Auflistung der geometrischen Abmaße der Maschinenkreismesser im unbenutzten Zustand. Alle Angaben in mm.

| Bezeichnung | Durchmesser | Materialstärke | Zentralbohrung | Flansch |
|--------------|-------------|----------------|----------------|-----------|
| 1000er Ronde | 1000 | 8 | 60 | 320 |
| 870er Ronde | 870 | 6 | 60 | 380 |
| 810er Ronde | 810 | 6 | 60 | 320 |
| 611er Ronde | 611 | 5 | 68 / 82 / 100 | 180 - 230 |

Tabelle 13: Ergebnisse der Ausgangsanordnung des durchgeführten Nestings. Angegeben ist die Stückzahl mit den Massen und Volumen pro Stück, sowie den daraus resultierenden Werten.

| Ausgangsanordnung Anordnung | | | | | |
|-------------------------------------|--------|-------|-------------|--------------------|--------------------|
| | Anzahl | Masse | Gesamtmasse | Volumen | Gesamtvolumen |
| | [Stk.] | [g] | [g] | [mm ²] | [mm ²] |
| Verschlissenes Maschinenkreismesser | 1 | 5401 | 5401 | 688026 | 688026 |
| D = 500 mm | | | | | |
| Drechselmeißel | 4 | 145 | 580 | 18461 | 73844 |
| Hakenklinge | 22 | 52 | 1144 | 6787 | 149 323 |
| Verschnitt | 1 | 2750 | 2750 | 350392 | 350392 |
| Halbzeuge | 26 | | 2.651 | | 337.635 |
| Repurpose-Werkzeuge | 26 | | 1724 | | 223167 |
| Schleifen | | | 927 | | 114.468 |

Tabelle 14: Ergebnisse der optimierten Nesting Anordnung. Angegeben ist die Stückzahl mit den Massen und Volumen pro Stück, sowie den daraus resultierenden Werten.

| | Optimierte Anordnung | | | | |
|---|----------------------|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| | Anzahl [Stk.] | Masse [g] | Gesamtmasse [g] | Volumen [mm ²] | Gesamtvolumen [mm ²] |
| Verschlissenes Maschinenkreismesser D = 500 mm | 1 | 5401 | 5401 | 688026 | 688026 |
| Drechselmeißel | 4 | 145 | 580 | 18461 | 73844 |
| Hakenklinge | 22 | 52 | 1144 | 6787 | 149323 |
| Verschnitt | 1 | 2954 | 2954 | 376247 | 376247 |
| Halbzeuge | 26 | | 2447 | | 311780 |
| Repurpose-Werkzeuge | 26 | | 1724 | | 223167 |
| Schleifen | | | 723 | | 88613 |

Tabelle 15: Geometrische Ritzkennwerte des 75Cr1 (1.2003). Angegeben sind die ermittelten Werte der Ritztiefe, Ritzbreite und der F_{ab} -Wert bei entsprechender Ritzrichtung und Ritzlänge.

| Ritzrichtung | Ritzlänge in μm | Ritztiefe in μm | Ritzbreite in μm | Fab-Wert |
|--------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 0° | 100 | $0,29 \pm 0,02$ | $4,66 \pm 0,15$ | $0,72 \pm 0,08$ |
| | 200 | $0,53 \pm 0,03$ | $6,48 \pm 0,16$ | $0,67 \pm 0,04$ |
| | 300 | $0,83 \pm 0,01$ | $7,60 \pm 0,11$ | $0,55 \pm 0,07$ |
| | 400 | $1,37 \pm 0,07$ | $10,80 \pm 0,43$ | $0,69 \pm 0,05$ |
| | 500 | $2,34 \pm 0,32$ | $13,94 \pm 1,18$ | $0,92 \pm 0,06$ |
| | 600 | $2,72 \pm 0,28$ | $15,66 \pm 0,97$ | $0,87 \pm 0,09$ |
| | 700 | $2,85 \pm 0,38$ | $16,45 \pm 1,84$ | $0,82 \pm 0,13$ |
| | 800 | $3,44 \pm 0,25$ | $17,17 \pm 0,62$ | $0,50 \pm 0,36$ |
| | 900 | $5,30 \pm 0,24$ | $21,13 \pm 2,21$ | $0,66 \pm 0,09$ |
| | 1000 | $6,19 \pm 0,28$ | $23,10 \pm 1,49$ | $0,83 \pm 0,15$ |
| 90° | 100 | $0,21 \pm 0,02$ | $3,64 \pm 0,19$ | $0,36 \pm 0,22$ |
| | 200 | $0,49 \pm 0,04$ | $5,88 \pm 0,24$ | $0,56 \pm 0,14$ |
| | 300 | $0,74 \pm 0,06$ | $7,55 \pm 0,18$ | $0,56 \pm 0,09$ |
| | 400 | $1,47 \pm 0,24$ | $10,82 \pm 1,06$ | $0,75 \pm 0,16$ |
| | 500 | $2,66 \pm 0,16$ | $15,37 \pm 1,06$ | $0,97 \pm 0,03$ |
| | 600 | $2,41 \pm 0,32$ | $14,20 \pm 1,40$ | $0,79 \pm 0,13$ |
| | 700 | $2,83 \pm 0,61$ | $16,87 \pm 1,12$ | $0,70 \pm 0,18$ |
| | 800 | $4,36 \pm 0,51$ | $19,41 \pm 0,49$ | $0,84 \pm 0,07$ |
| | 900 | $5,12 \pm 0,96$ | $18,40 \pm 1,74$ | $0,52 \pm 0,57$ |
| | 1000 | $4,53 \pm 1,22$ | $19,69 \pm 2,72$ | $0,86 \pm 0,11$ |

Tabelle 16: Geometrische Ritzkennwerte des 80CrV2 (1.2235). Angegeben sind die ermittelten Werte der Ritztiefe, Ritzbreite und der F_{ab} -Wert bei entsprechender Ritzrichtung und Ritzlänge.

| Ritzrichtung | Ritzlänge in μm | Ritztiefe in μm | Ritzbreite in μm | Fab-Wert |
|--------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 0° | 100 | $0,29 \pm 0,03$ | $4,37 \pm 0,15$ | $0,77 \pm 0,05$ |
| | 200 | $0,34 \pm 0,04$ | $5,31 \pm 0,24$ | $0,37 \pm 0,05$ |
| | 300 | $0,52 \pm 0,05$ | $6,08 \pm 0,38$ | $0,23 \pm 0,08$ |
| | 400 | $0,77 \pm 0,12$ | $8,01 \pm 0,41$ | $0,55 \pm 0,04$ |
| | 500 | $1,77 \pm 0,56$ | $12,57 \pm 1,84$ | $0,80 \pm 0,11$ |
| | 600 | $2,82 \pm 0,11$ | $15,95 \pm 0,95$ | $0,98 \pm 0,01$ |
| | 700 | $2,76 \pm 0,49$ | $14,18 \pm 5,05$ | $0,80 \pm 0,24$ |
| | 800 | $3,77 \pm 0,90$ | $19,59 \pm 1,87$ | $0,85 \pm 0,17$ |
| | 900 | $4,05 \pm 1,16$ | $17,82 \pm 2,41$ | $0,77 \pm 0,18$ |
| | 1000 | $4,43 \pm 1,47$ | $18,51 \pm 2,87$ | $0,60 \pm 0,24$ |
| 90° | 100 | $0,23 \pm 0,02$ | $4,27 \pm 0,25$ | $0,42 \pm 0,21$ |
| | 200 | $0,40 \pm 0,08$ | $5,71 \pm 0,44$ | $0,34 \pm 0,06$ |
| | 300 | $0,64 \pm 0,07$ | $6,51 \pm 0,39$ | $0,21 \pm 0,08$ |
| | 400 | $1,22 \pm 0,08$ | $10,12 \pm 0,56$ | $0,63 \pm 0,06$ |
| | 500 | $2,87 \pm 0,02$ | $16,52 \pm 0,25$ | $0,15 \pm 0,55$ |
| | 600 | $3,30 \pm 0,45$ | $17,25 \pm 1,27$ | $0,51 \pm 0,65$ |
| | 700 | $3,32 \pm 0,73$ | $17,48 \pm 2,83$ | $0,95 \pm 0,06$ |
| | 800 | $3,46 \pm 1,22$ | $18,28 \pm 2,55$ | $0,69 \pm 0,28$ |
| | 900 | $3,61 \pm 1,08$ | $18,53 \pm 4,14$ | $0,67 \pm 0,36$ |
| | 1000 | $4,69 \pm 0,76$ | $18,87 \pm 1,78$ | $0,80 \pm 0,21$ |

Tabelle 17: Geometrische Ritzkennwerte des HS6-5-2C (1.3343). Angegeben sind die ermittelten Werte der Ritztiefe, Ritzbreite und der F_{ab} -Wert bei entsprechender Ritzrichtung und Ritzlänge.

| Ritzrichtung | Ritzlänge in μm | Ritztiefe in μm | Ritzbreite in μm | Fab-Wert |
|--------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 0° | 100 | $0,12 \pm 0,06$ | $2,67 \pm 0,19$ | $0,64 \pm 0,09$ |
| | 200 | $0,30 \pm 0,03$ | $4,79 \pm 0,42$ | $0,82 \pm 0,10$ |
| | 300 | $0,34 \pm 0,05$ | $4,88 \pm 0,56$ | $0,40 \pm 0,20$ |
| | 400 | $0,48 \pm 0,04$ | $6,37 \pm 0,43$ | $0,57 \pm 0,14$ |
| | 500 | $0,66 \pm 0,03$ | $7,28 \pm 0,10$ | $0,60 \pm 0,10$ |
| | 600 | $0,87 \pm 0,06$ | $8,28 \pm 0,18$ | $0,66 \pm 0,09$ |
| | 700 | $1,53 \pm 0,03$ | $11,45 \pm 0,22$ | $0,84 \pm 0,04$ |
| | 800 | $2,23 \pm 0,26$ | $14,42 \pm 0,81$ | $0,90 \pm 0,08$ |
| | 900 | $2,54 \pm 0,17$ | $14,77 \pm 0,39$ | $0,88 \pm 0,08$ |
| | 1000 | $3,03 \pm 0,29$ | $16,58 \pm 1,29$ | $0,93 \pm 0,03$ |
| 45° | 100 | $0,10 \pm 0,01$ | $3,27 \pm 0,01$ | $0,68 \pm 0,12$ |
| | 200 | $0,18 \pm 0,03$ | $3,93 \pm 0,32$ | $0,51 \pm 0,04$ |
| | 300 | $0,38 \pm 0,03$ | $5,13 \pm 0,03$ | $0,61 \pm 0,09$ |
| | 400 | $0,44 \pm 0,02$ | $5,96 \pm 0,38$ | $0,57 \pm 0,06$ |
| | 500 | $0,63 \pm 0,10$ | $6,87 \pm 0,09$ | $0,51 \pm 0,08$ |
| | 600 | $0,73 \pm 0,02$ | $7,53 \pm 0,08$ | $0,47 \pm 0,09$ |
| | 700 | $0,97 \pm 0,03$ | $9,06 \pm 0,10$ | $0,69 \pm 0,10$ |
| | 800 | $1,71 \pm 0,26$ | $12,01 \pm 0,81$ | $0,73 \pm 0,16$ |
| | 900 | $2,24 \pm 0,12$ | $14,08 \pm 0,63$ | $0,86 \pm 0,05$ |
| | 1000 | $2,69 \pm 0,27$ | $14,51 \pm 0,84$ | $0,95 \pm 0,06$ |
| 90° | 100 | $0,14 \pm 0,05$ | $3,07 \pm 0,16$ | $0,79 \pm 0,09$ |
| | 200 | $0,27 \pm 0,03$ | $4,75 \pm 0,19$ | $0,81 \pm 0,01$ |
| | 300 | $0,36 \pm 0,01$ | $5,24 \pm 0,10$ | $0,69 \pm 0,11$ |
| | 400 | $0,57 \pm 0,05$ | $6,87 \pm 0,20$ | $0,88 \pm 0,04$ |
| | 500 | $0,60 \pm 0,02$ | $7,58 \pm 0,30$ | $0,78 \pm 0,07$ |
| | 600 | $0,85 \pm 0,07$ | $8,04 \pm 0,25$ | $0,67 \pm 0,10$ |
| | 700 | $1,27 \pm 0,30$ | $10,26 \pm 0,98$ | $0,75 \pm 0,08$ |
| | 800 | $1,85 \pm 0,06$ | $14,04 \pm 0,97$ | $0,74 \pm 0,19$ |
| | 900 | $2,45 \pm 0,24$ | $14,44 \pm 0,62$ | $0,87 \pm 0,04$ |
| | 1000 | $2,73 \pm 0,13$ | $15,70 \pm 0,42$ | $0,75 \pm 0,23$ |

Tabelle 18: Geometrische Ritzkennwerte des X153CrMoV12 längs (1.2379). Angegeben sind die ermittelten Werte der Ritztiefe, Ritzbreite und der F_{ab} -Wert bei entsprechender Ritzrichtung und Ritzlänge.

| Ritzrichtung | Ritzlänge in μm | Ritztiefe in μm | Ritzbreite in μm | Fab-Wert |
|--------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 0° | 100 | $0,18 \pm 0,04$ | $3,26 \pm 0,33$ | $0,79 \pm 0,22$ |
| | 200 | $0,20 \pm 0,08$ | $3,74 \pm 0,92$ | $0,68 \pm 0,31$ |
| | 300 | $0,41 \pm 0,03$ | $5,53 \pm 0,39$ | $0,68 \pm 0,23$ |
| | 400 | $0,48 \pm 0,06$ | $6,36 \pm 0,79$ | $0,78 \pm 0,09$ |
| | 500 | $0,74 \pm 0,04$ | $7,72 \pm 0,15$ | $0,85 \pm 0,02$ |
| | 600 | $0,93 \pm 0,12$ | $9,27 \pm 0,39$ | $0,86 \pm 0,10$ |
| | 700 | $1,18 \pm 0,36$ | $10,35 \pm 1,69$ | $0,63 \pm 0,11$ |
| | 800 | $1,84 \pm 0,34$ | $12,60 \pm 1,35$ | $0,63 \pm 0,21$ |
| | 900 | $2,17 \pm 0,79$ | $13,35 \pm 2,95$ | $0,89 \pm 0,08$ |
| | 1000 | $2,28 \pm 0,31$ | $14,01 \pm 1,12$ | $0,90 \pm 0,06$ |
| 45° | 100 | $0,16 \pm 0,01$ | $2,75 \pm 0,49$ | $0,50 \pm 0,41$ |
| | 200 | $0,26 \pm 0,01$ | $3,88 \pm 0,31$ | $0,65 \pm 0,02$ |
| | 300 | $0,37 \pm 0,03$ | $4,70 \pm 0,31$ | $0,38 \pm 0,07$ |
| | 400 | $0,50 \pm 0,04$ | $6,31 \pm 0,20$ | $0,66 \pm 0,04$ |
| | 500 | $0,67 \pm 0,01$ | $7,03 \pm 0,42$ | $0,62 \pm 0,15$ |
| | 600 | $0,83 \pm 0,03$ | $8,33 \pm 0,33$ | $0,57 \pm 0,12$ |
| | 700 | $1,28 \pm 0,06$ | $10,22 \pm 0,18$ | $0,69 \pm 0,17$ |
| | 800 | $1,67 \pm 0,26$ | $11,60 \pm 0,76$ | $0,80 \pm 0,08$ |
| | 900 | $2,48 \pm 0,10$ | $14,57 \pm 0,45$ | $0,94 \pm 0,02$ |
| | 1000 | $2,62 \pm 0,30$ | $14,11 \pm 0,50$ | $0,90 \pm 0,02$ |
| 90° | 100 | $0,08 \pm 0,03$ | $2,69 \pm 0,25$ | $0,24 \pm 0,33$ |
| | 200 | $0,22 \pm 0,05$ | $4,50 \pm 0,93$ | $0,64 \pm 0,38$ |
| | 300 | $0,37 \pm 0,05$ | $5,72 \pm 0,32$ | $0,76 \pm 0,09$ |
| | 400 | $0,52 \pm 0,03$ | $6,43 \pm 0,27$ | $0,70 \pm 0,15$ |
| | 500 | $0,55 \pm 0,08$ | $6,96 \pm 0,54$ | $0,50 \pm 0,21$ |
| | 600 | $0,91 \pm 0,02$ | $9,28 \pm 0,29$ | $0,72 \pm 0,11$ |
| | 700 | $1,51 \pm 0,29$ | $10,85 \pm 0,95$ | $0,73 \pm 0,26$ |
| | 800 | $1,84 \pm 0,20$ | $12,59 \pm 1,02$ | $0,88 \pm 0,06$ |
| | 900 | $2,36 \pm 0,26$ | $14,41 \pm 0,52$ | $0,84 \pm 0,12$ |
| | 1000 | $2,41 \pm 0,54$ | $13,85 \pm 1,03$ | $0,90 \pm 0,02$ |

Tabelle 19: Geometrische Ritzkennwerte des X153CrMoV12 quer (1.2379). Angegeben sind die ermittelten Werte der Ritztiefe, Ritzbreite und der F_{ab} -Wert bei entsprechender Ritzrichtung und Ritzlänge.

| Ritzrichtung | Ritzlänge in μm | Ritztiefe in μm | Ritzbreite in μm | Fab-Wert |
|--------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| 0° | 100 | $0,18 \pm 0,01$ | $3,40 \pm 0,01$ | $0,52 \pm 0,19$ |
| | 200 | $0,21 \pm 0,04$ | $4,83 \pm 0,42$ | $0,61 \pm 0,32$ |
| | 300 | $0,33 \pm 0,08$ | $5,28 \pm 0,53$ | $0,61 \pm 0,22$ |
| | 400 | $0,44 \pm 0,02$ | $6,12 \pm 0,69$ | $0,76 \pm 0,03$ |
| | 500 | $0,68 \pm 0,02$ | $7,44 \pm 0,25$ | $0,80 \pm 0,09$ |
| | 600 | $0,95 \pm 0,14$ | $8,90 \pm 0,84$ | $0,83 \pm 0,06$ |
| | 700 | $1,65 \pm 0,23$ | $11,26 \pm 1,03$ | $0,85 \pm 0,09$ |
| | 800 | $1,72 \pm 0,50$ | $12,30 \pm 2,05$ | $0,90 \pm 0,05$ |
| | 900 | $2,04 \pm 0,19$ | $12,07 \pm 0,76$ | $0,80 \pm 0,10$ |
| | 1000 | $2,55 \pm 0,33$ | $14,85 \pm 0,85$ | $0,98 \pm 0,01$ |
| 45° | 100 | $0,12 \pm 0,01$ | $2,91 \pm 0,01$ | $0,51 \pm 0,12$ |
| | 200 | $0,24 \pm 0,01$ | $4,48 \pm 0,01$ | $0,57 \pm 0,21$ |
| | 300 | $0,34 \pm 0,03$ | $5,06 \pm 0,21$ | $0,68 \pm 0,16$ |
| | 400 | $0,33 \pm 0,09$ | $5,52 \pm 0,69$ | $0,74 \pm 0,24$ |
| | 500 | $0,53 \pm 0,10$ | $6,77 \pm 0,58$ | $0,51 \pm 0,18$ |
| | 600 | $1,15 \pm 0,23$ | $8,95 \pm 0,83$ | $0,91 \pm 0,09$ |
| | 700 | $1,07 \pm 0,14$ | $9,45 \pm 0,44$ | $0,66 \pm 0,15$ |
| | 800 | $2,01 \pm 0,20$ | $13,21 \pm 0,65$ | $0,88 \pm 0,03$ |
| | 900 | $2,31 \pm 0,28$ | $12,98 \pm 0,71$ | $0,85 \pm 0,11$ |
| | 1000 | $2,58 \pm 0,25$ | $15,14 \pm 1,68$ | $0,96 \pm 0,01$ |
| 90° | 100 | $0,12 \pm 0,04$ | $3,03 \pm 0,68$ | $0,61 \pm 0,32$ |
| | 200 | $0,27 \pm 0,04$ | $4,65 \pm 0,37$ | $0,90 \pm 0,04$ |
| | 300 | $0,37 \pm 0,02$ | $5,32 \pm 0,21$ | $0,70 \pm 0,08$ |
| | 400 | $0,52 \pm 0,07$ | $6,54 \pm 0,47$ | $0,69 \pm 0,03$ |
| | 500 | $0,72 \pm 0,07$ | $7,52 \pm 0,35$ | $0,72 \pm 0,10$ |
| | 600 | $0,93 \pm 0,29$ | $8,56 \pm 1,44$ | $0,65 \pm 0,22$ |
| | 700 | $1,52 \pm 0,28$ | $11,09 \pm 1,00$ | $0,84 \pm 0,03$ |
| | 800 | $1,66 \pm 0,29$ | $12,34 \pm 1,07$ | $0,77 \pm 0,06$ |
| | 900 | $2,40 \pm 0,16$ | $14,42 \pm 0,43$ | $0,86 \pm 0,06$ |
| | 1000 | $2,83 \pm 0,09$ | $16,28 \pm 0,18$ | $0,92 \pm 0,10$ |

Tabelle 20: Maximal gemessene Temperaturen der Thermoelemente T₁ bis T₄ während der Verschleißversuche der konventionellen und Repurpose-Drehsselmeißel. Alle Angaben in °C.

| | 80CrV2 (1.2235) | HS6-5-2C (1.3343) | X153CrMoV12 (1.2379) parallel | X155CrMoV12 (1.2379) senkrecht |
|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| T1 _{max} | 295,2 | 276,2 | 288,3 | 289,3 |
| T2 _{max} | 301,3 | 287,3 | 297,2 | 300,2 |
| T3 _{max} | 288,3 | 277,2 | 273,2 | 288,3 |
| T4 _{max} | 231,7 | 237,8 | 256,1 | 271,2 |

Tabelle 21: Die ermittelten Gewichte der Drehsselbeitel vor und nach den druchgeführten Verschleißversuchen. Alle Angaben in g.

| Werkstoff | Kurzname | Karbidausrichtung | Gewicht vor Einsatz | Gewicht nach Einsatz | Differenz |
|-----------|-------------|-------------------|---------------------|----------------------|-----------|
| 1.2235 | 80CrV2 | - | 213,58 | 213,54 | 0,04 |
| 1.3343 | HS6-5-2C | - | 191,19 | 191,2 | 0,01 |
| 1.2379 | X153CrMoV12 | quer | 179,34 | 179,27 | 0,07 |
| | | längs | 179,66 | 179,63 | 0,03 |

Tabelle 22: Ermittelte prozentuale Änderung der Drehsselbeitelspitze nach den Verschleißversuchen.

| Drehsselbeitel | Prozentuale Änderung [%] | |
|----------------------------|--------------------------|---------------|
| | Draufsicht | Seitenansicht |
| 80CrV2 (1.2235) | 10,98 | 9,77 |
| X153CrMoV12 (1.2379) Längs | 2,03 | 1,73 |
| X153CrMoV12 (1.2379) Quer | 2,61 | 3,03 |
| HS6-5-2C (1.3343) | 5,15 | 5,65 |

Tabelle 23: Ermittelte durchschnittliche Schnittkraft der einzelnen Schneidzeuge im Bereich zwischen 50 mm und 200 mm.

| Zyklus | 75Cr1 (1.2003) | X153CrMoV12-1 (1.2379) längs | X153CrMoV12-1 (1.2379) quer |
|--------|----------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 159,36 N | 177,86 N | 185,83 N |
| 5 | 156,73 N | 178,34 N | 183,35 N |
| 10 | 151,97 N | 179,53 N | 183,53 N |
| 15 | 154,57 N | 173,70 N | 180,57 N |
| 20 | 166,20 N | 194,51 N | 189,94 N |
| 25 | 175,63 N | 188,23 N | 195,75 N |
| 30 | 195,96 N | 179,09 N | 181,75 N |
| 35 | 201,64 N | 193,98 N | 190,01 N |
| 40 | 187,17 N | 193,66 N | 180,30 N |
| 45 | 186,80 N | 195,33 N | 195,81 N |
| 50 | 200,77 N | 191,64 N | 189,35 N |

Tabelle 24: Gewichte vor und nach dem Schneidleistungstest der konventionellen und Repurpose-Hakenklinge. Alle Angaben in g.

| Material | Ausgangsgewicht | Verschleißgewicht | Differenz |
|------------------------------|-----------------|-------------------|-----------|
| 75Cr1 (1.2003) | 47,19 | 47,15 | -0,04 |
| X153CrMoV12-1 (1.2379) längs | 95,67 | 95,66 | -0,01 |
| X153CrMoV12-1 (1.2379) quer | 95,67 | 95,66 | -0,01 |

Tabelle 25: Geometrie der Hakenklingschneide im Ausgangszustand und verschlissenen Zustand.

| | | 75Cr1 (1.2003) | X153CrMoV12 (1.2379) längs | X153CrMoV12 (1.2379) quer |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Kantenverrundung in μm | Ausgangszustand | 31 | 6 | 13 |
| | Verschleißzustand | 318 | 24 | 26 |
| Schneidenwinkel in $^{\circ}$ | Ausgangszustand | 55 | 54 | 54 |
| | Verschleißzustand | 55 | 54 | 54 |
| Schneidendicke in mm | Ausgangszustand | 1,8 | 2,7 | 2,7 |
| | Verschleißzustand | 1,8 | 2,7 | 2,6 |
| Schneidenlänge in mm | Ausgangszustand | 3,2 | 4,2 | 4 |
| | Verschleißzustand | 2,5 | 3,9 | 3,7 |

Tabelle 26: Gemessene Wärmeleitfähigkeiten λ in Abhängigkeit der Temperatur der in dieser Arbeit verwendeten Werkstoffe. Die Wärmeleitfähigkeit ist in $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ angegeben.

| Temperatur | 80CrV2 (1.2235) | HS6-5-2C (1.3343) | X153CrMoV12 (1.2379) |
|------------|-----------------|-------------------|----------------------|
| 60 °C | 40,01 ± 0,57 | 29,31 ± 0,34 | 19,88 ± 0,20 |
| 120 °C | 40,51 ± 0,38 | 29,79 ± 0,26 | 24,34 ± 0,24 |
| 180 °C | 39,29 ± 0,35 | 29,51 ± 0,25 | 23,71 ± 0,23 |
| 240 °C | 37,41 ± 0,34 | 30,26 ± 0,24 | 23,96 ± 0,22 |
| 300 °C | 21,53 ± 0,31 | 31,08 ± 0,24 | 24,37 ± 0,21 |
| 400 °C | 32,93 ± 0,30 | 32,00 ± 0,24 | 25,26 ± 0,24 |
| 500 °C | 30,20 ± 0,22 | 29,96 ± 0,21 | 22,66 ± 0,07 |

Tabelle 27: Temperaturabhängige Werte des spezifischen elektrischen Widerstandes der in dieser Arbeit verwendeten Werkstoffe. Alle Angaben in $\mu\text{m } \Omega \text{ m}$.

| Temperatur | 80CrV2 | HS6-5-2C | X153CrMoV12-1 Quer | X153CrMoV12-1 Längs |
|------------|-------------|-------------|--------------------|---------------------|
| 40 °C | 0,35 ± 0,02 | 0,49 ± 0,01 | 0,57 ± 0,05 | 0,54 ± 0,01 |
| 60 °C | 0,36 ± 0,02 | 0,50 ± 0,01 | 0,59 ± 0,05 | 0,55 ± 0,02 |
| 80 °C | 0,37 ± 0,02 | 0,51 ± 0,01 | 0,60 ± 0,05 | 0,56 ± 0,02 |
| 100 °C | 0,40 ± 0,03 | 0,53 ± 0,01 | 0,61 ± 0,06 | 0,58 ± 0,03 |
| 120 °C | 0,40 ± 0,02 | 0,54 ± 0,01 | 0,63 ± 0,01 | 0,59 ± 0,01 |
| 140 °C | 0,42 ± 0,02 | 0,55 ± 0,01 | 0,64 ± 0,01 | 0,61 ± 0,01 |
| 160 °C | 0,43 ± 0,01 | 0,57 ± 0,01 | 0,66 ± 0,01 | 0,62 ± 0,01 |
| 180 °C | 0,45 ± 0,01 | 0,59 ± 0,01 | 0,67 ± 0,01 | 0,64 ± 0,01 |
| 200 °C | 0,46 ± 0,01 | 0,60 ± 0,01 | 0,69 ± 0,01 | 0,65 ± 0,01 |
| 220 °C | 0,47 ± 0,01 | 0,62 ± 0,01 | 0,70 ± 0,01 | 0,67 ± 0,01 |
| 240 °C | 0,47 ± 0,01 | 0,63 ± 0,01 | 0,72 ± 0,01 | 0,69 ± 0,01 |
| 260 °C | 0,48 ± 0,01 | 0,65 ± 0,01 | 0,74 ± 0,01 | 0,70 ± 0,01 |
| 280 °C | 0,49 ± 0,01 | 0,67 ± 0,01 | 0,75 ± 0,01 | 0,72 ± 0,01 |
| 300 °C | 0,50 ± 0,01 | 0,68 ± 0,01 | 0,77 ± 0,01 | 0,74 ± 0,01 |
| 350 °C | 0,55 ± 0,01 | 0,73 ± 0,01 | 0,82 ± 0,01 | 0,78 ± 0,01 |
| 400 °C | 0,61 ± 0,01 | 0,78 ± 0,01 | 0,87 ± 0,01 | 0,82 ± 0,01 |
| 450 °C | 0,67 ± 0,01 | 0,82 ± 0,01 | 0,92 ± 0,01 | 0,87 ± 0,01 |
| 500 °C | 0,73 ± 0,01 | 0,87 ± 0,01 | 0,98 ± 0,01 | 0,92 ± 0,01 |

Tabelle 28: Temperaturabhängige Werte des Anteils der Wärmeleitfähigkeit der in dieser Arbeit verwendeten Werkstoffe. Alle Angaben in $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$.

| Temperatur | 80CrV2 HS6-5-2C | X153CrMoV12-1 Quer | X153CrMoV12-1 Längs | |
|------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------|
| 40 °C | $2,87 \pm 0,66$ | $1,93 \pm 0,07$ | $1,70 \pm 0,23$ | $1,79 \pm 0,40$ |
| 60 °C | $4,11 \pm 0,57$ | $2,92 \pm 0,20$ | $2,50 \pm 0,04$ | $2,65 \pm 0,71$ |
| 80 °C | $5,24 \pm 0,86$ | $3,77 \pm 0,25$ | $3,24 \pm 0,11$ | $3,45 \pm 0,48$ |
| 100 °C | $6,35 \pm 0,72$ | $4,59 \pm 0,29$ | $3,97 \pm 0,05$ | $4,18 \pm 0,97$ |
| 120 °C | $7,27 \pm 1,12$ | $5,38 \pm 0,40$ | $4,63 \pm 0,12$ | $4,90 \pm 0,68$ |
| 140 °C | $8,16 \pm 1,19$ | $6,07 \pm 0,51$ | $5,29 \pm 0,15$ | $5,53 \pm 1,30$ |
| 160 °C | $9,03 \pm 1,34$ | $6,80 \pm 0,54$ | $5,86 \pm 0,25$ | $6,16 \pm 1,05$ |
| 180 °C | $9,73 \pm 1,45$ | $7,43 \pm 0,68$ | $6,45 \pm 0,17$ | $6,80 \pm 1,94$ |
| 200 °C | $10,57 \pm 1,54$ | $8,00 \pm 0,82$ | $6,97 \pm 0,27$ | $7,33 \pm 1,64$ |
| 220 °C | $11,41 \pm 1,25$ | $8,53 \pm 0,76$ | $7,50 \pm 0,18$ | $7,89 \pm 2,16$ |
| 240 °C | $12,62 \pm 1,74$ | $9,10 \pm 0,99$ | $7,99 \pm 0,25$ | $8,40 \pm 2,30$ |
| 260 °C | $13,35 \pm 1,74$ | $9,61 \pm 1,05$ | $8,45 \pm 0,31$ | $8,90 \pm 2,21$ |
| 280 °C | $13,92 \pm 1,81$ | $10,07 \pm 1,00$ | $8,88 \pm 0,30$ | $9,38 \pm 2,88$ |
| 300 °C | $14,48 \pm 1,47$ | $10,52 \pm 1,01$ | $9,28 \pm 0,38$ | $9,79 \pm 2,66$ |
| 350 °C | $15,53 \pm 1,62$ | $11,51 \pm 0,96$ | $10,18 \pm 0,45$ | $10,75 \pm 2,71$ |
| 400 °C | $15,98 \pm 1,87$ | $12,35 \pm 0,88$ | $10,99 \pm 0,42$ | $11,66 \pm 3,10$ |
| 450 °C | $16,37 \pm 2,32$ | $13,06 \pm 0,94$ | $11,66 \pm 0,88$ | $12,39 \pm 3,41$ |
| 500 °C | $16,63 \pm 2,46$ | $13,69 \pm 0,94$ | $12,26 \pm 1,24$ | $13,04 \pm 4,00$ |

Tabelle 29: Die Tabelle zeigt die Zeit und Energie, die aufgewendet muss, um eine Probe mit unterschiedlichen Parametern aus den Maschinenkreismessern herauszutrennen. Zudem zeigt die Tabelle die benötigte Energie, um die entstandene WEZ der Laserstrahl geschnittenen Proben durch Schleifen zu entfernen.

| Laserleistung für Materialstärke in mm | 6 | 8 | 10 | Optimiert |
|---|--------|--------|--------|-----------|
| Bearbeitungszeit für eine Probe: [s] | 30,2 | 37,8 | 50,3 | 22,4 |
| Benötigte Energie für eine Probe: [W h] | 31,88 | 39,90 | 53,09 | 19,36 |
| Volumen der WEZ: [mm^3] | 163,17 | 171,31 | 200,17 | 102,40 |
| Masse der WEZ: [g] | 1,289 | 1,353 | 1,581 | 0,809 |
| Schleifenergie: [kJ] | 67,95 | 71,41 | 83,31 | 42,66 |

Tabelle 30: Auflistung der abzuschleifenden Masse und der dafür benötigten Energie der konventionellen und der Repurpose-Werkzeuge.

| | | | Masse Schleifen | Energie Schleifen |
|---------------|----------------|-------------|-----------------|-------------------|
| Konventionell | Hakenklinge | 75Cr1 | 1,90 | 90,83 |
| | Drehsselmeißel | 80CrV2 | 45,00 | 2178,00 |
| | | HS6-5-2C | 22,00 | 1240,80 |
| Repurpose | Hakenklinge | X153CrMoV12 | 1,60 | 90,88 |
| | Drehsselmeißel | X153CrMoV12 | 4,40 | 249,92 |

Abbildungen

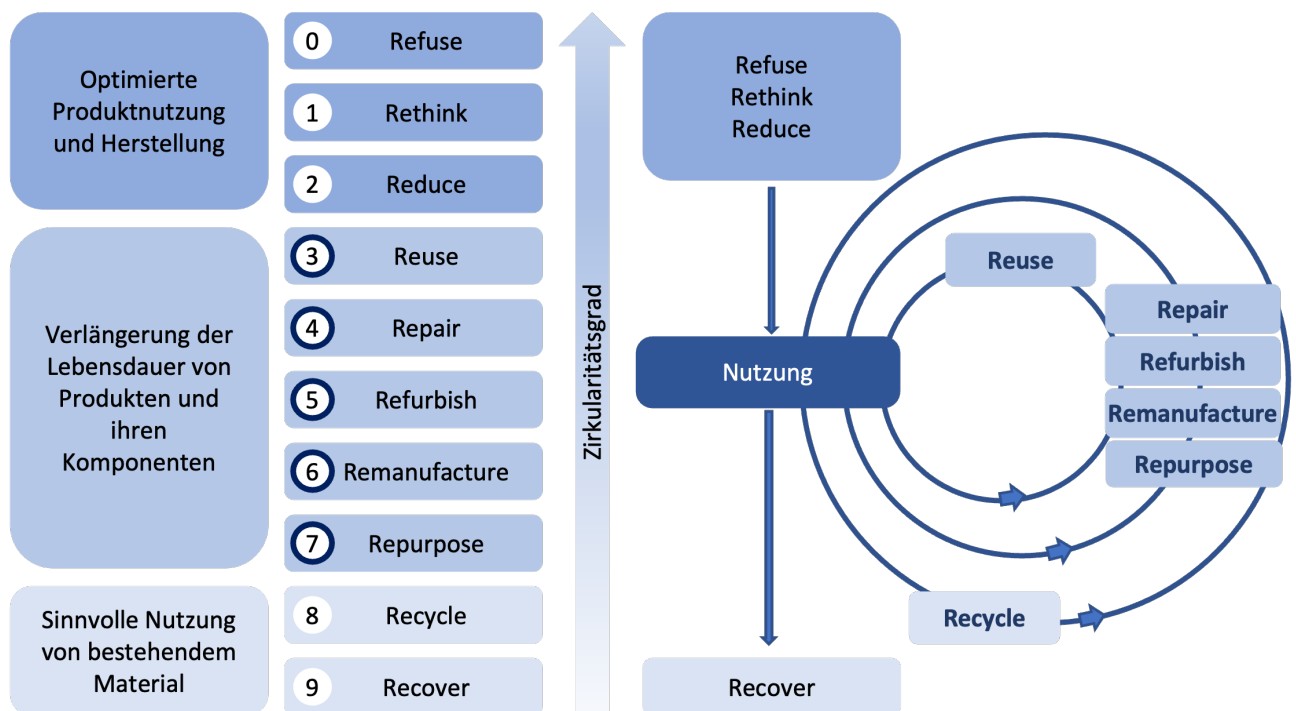


Abbildung 1: Darstellung der 10 Strategien (10Rs) einer Kreislaufwirtschaft nach Potting [13]. Die Sortierung der 10Rs erfolgt nach Gruppen und dem entsprechenden Zirkularitätsgrad (links), sowie der Positionierung innerhalb der Produktkette (rechts).

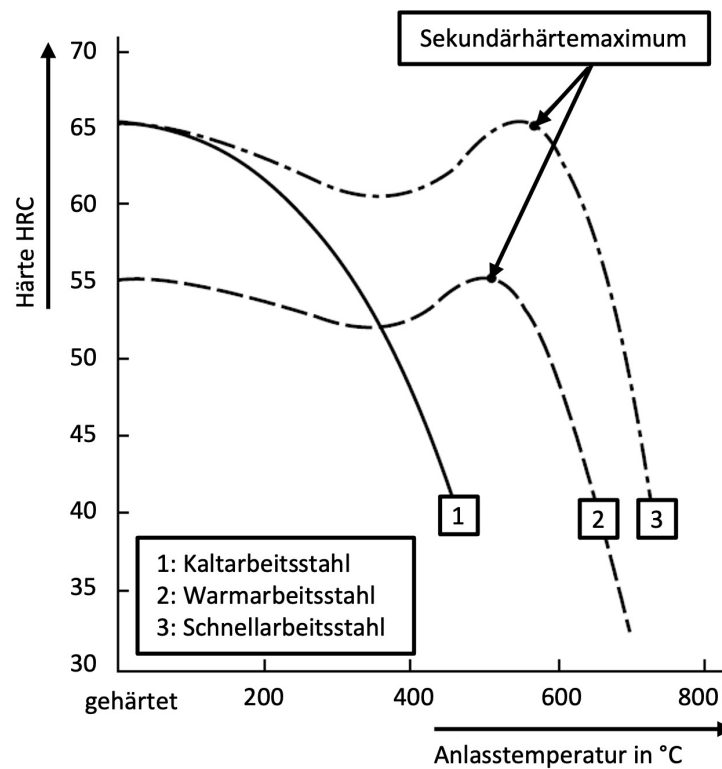


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Abhängigkeit der Härte von der Temperatur von Kalt-, Warm- und Schnellarbeitsstählen.

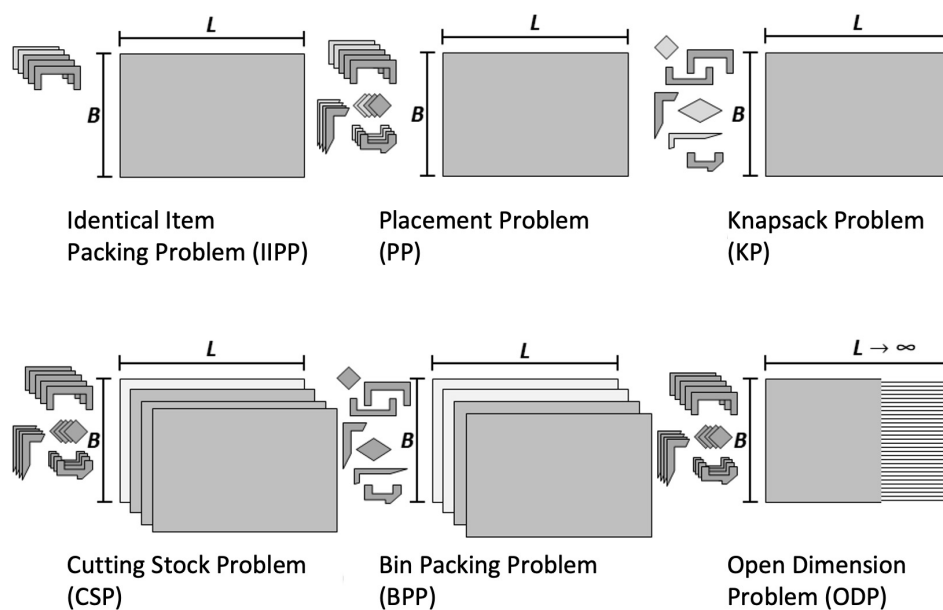


Abbildung 3: Darstellung der Grundvarianten von irregulären Schnitt- und Packproblemvarianten nach [76].

Die oberen Verfahren sind Output-Maximierungsprobleme und die unteren Verfahren sind Input-Minimierungsprobleme.

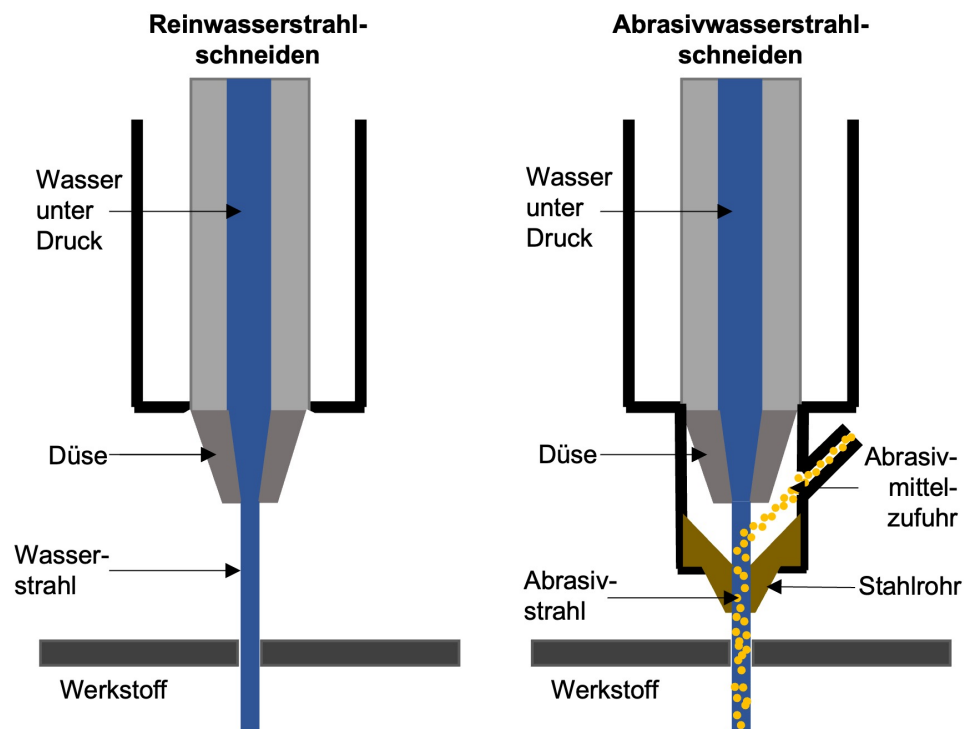


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Prinzip des Wasserstrahlschneidens. Links Erzeugung eines Hochdruckwasserstrahls für das Reinwasserstrahlschneiden. Rechts Erzeugung eines Wasserabstrahlstrahls für das Wasserstrahlabrasivschneiden.

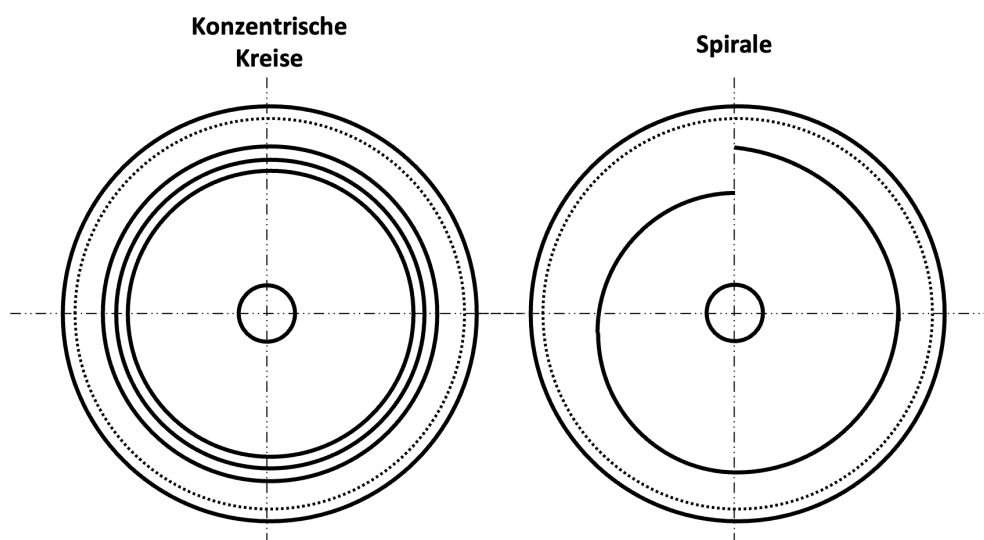


Abbildung 5: Schematische Darstellung von zwei verschiedenen Arten Spannungswalzringe in Maschinenkreismessern anzuordnen. Links werden die Spannungswalzringe in konzentrischen Ringen angeordnet. Rechts erfolgt das Einbringen der Spannungswalzringen in einer Spirale.

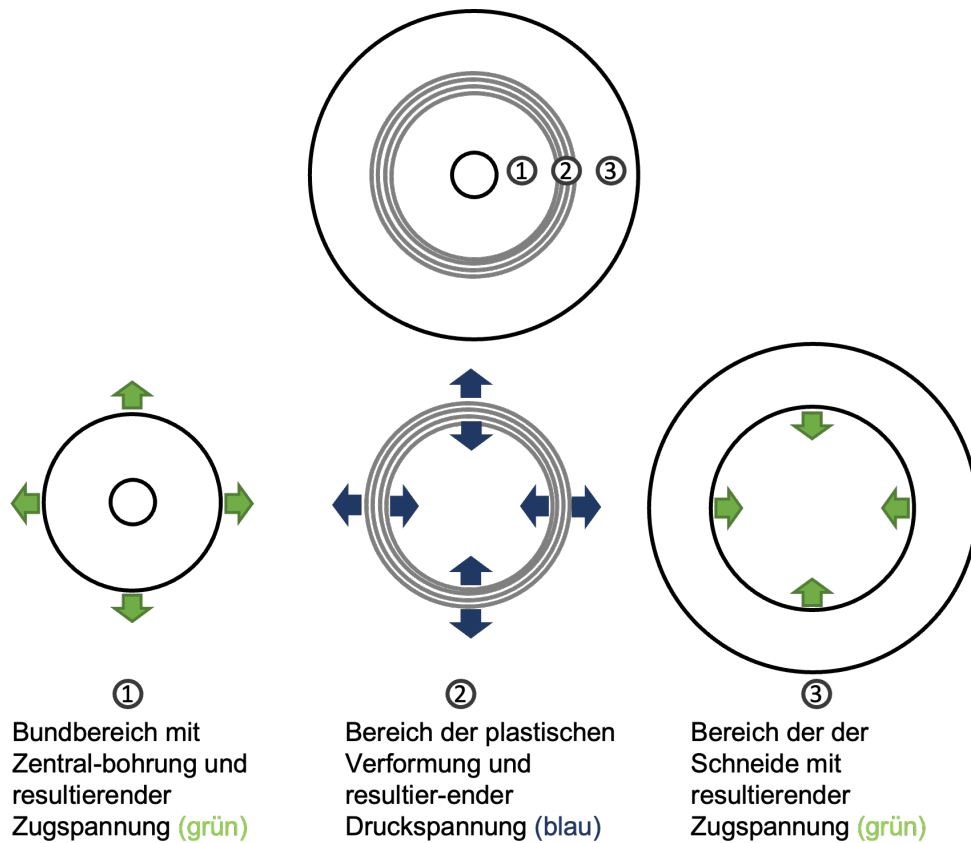


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Spannungsbereiche innerhalb eines scheibenförmigen Werkzeuges in Anlehnung an [153].

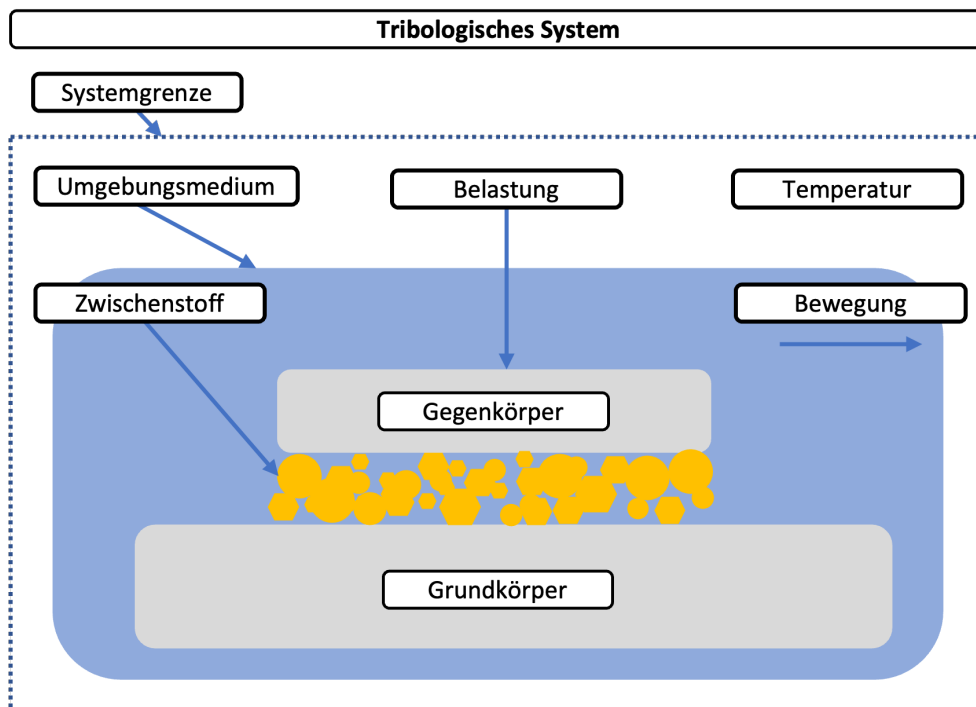


Abbildung 7: Schematische Darstellung eines tribologischen Systems. Umgebungsmedium, Zwischenstoff, Grund- und Gegenkörper stellen die Triboelemente dar. Belastung, Bewegung und Temperatur bilden das Beanspruchungskollektiv.

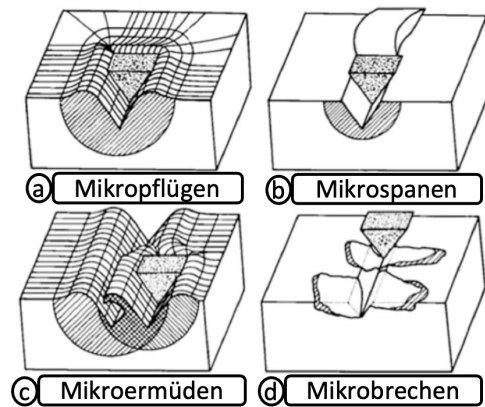


Abbildung 8: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Abrasionsmechanismen nach [171].

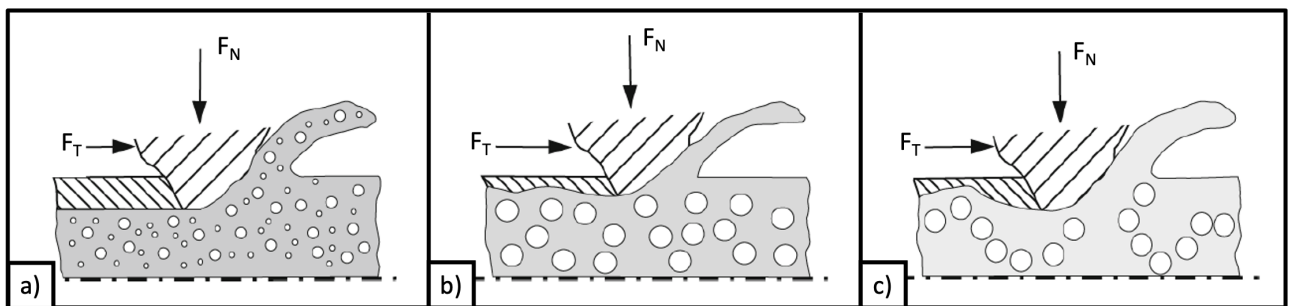


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Verschleißvorgangs bei abrasivem Angriff mit verschiedenen Hartphasen in Werkstoffen nach [45] a) Hartphasen zu klein b) Hartphasen wirksam groß c) Hartphasen ungünstig angeordnet.

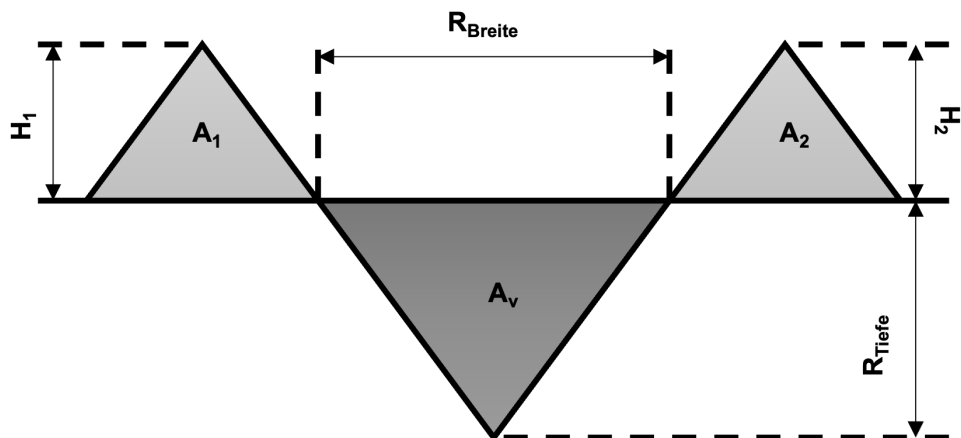


Abbildung 10: Schematische Darstellung einer Verschleißfurche im Querschnitt mit den zur f_{ab} -Wert Ermittlung nötigen Flächen.

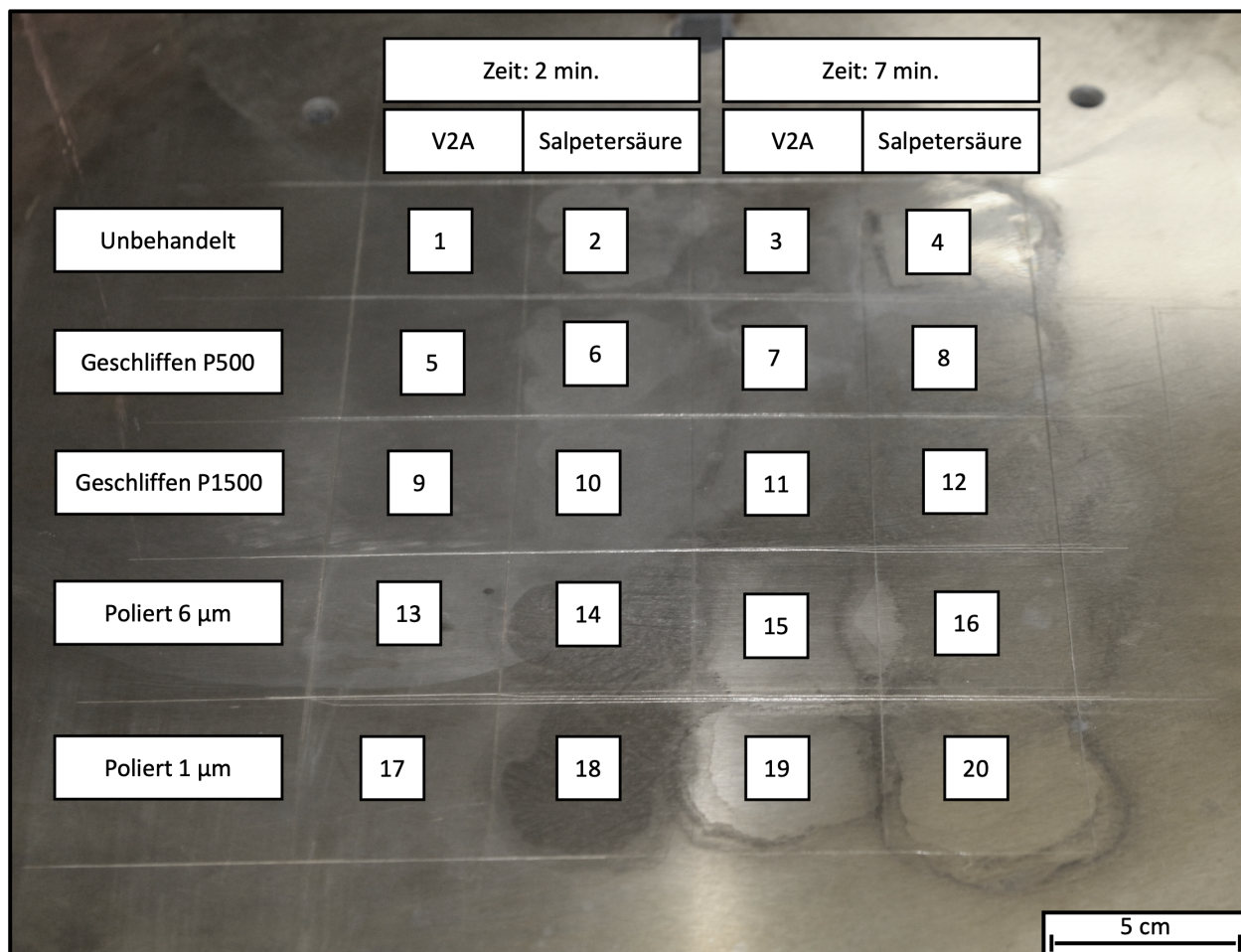


Abbildung 11: Darstellung des 4x5 Schrachbrettmusters mit 5 cm x 5 cm großen Versuchsflächen für die Vor-Ort Metallographie auf einem Maschinenkreismesser. Es wurde zwischen unbehandelten, geschliffenen und polierten Oberflächen unterschieden. Des Weiteren wurden zwei verschiedene Ätzmittel mit unterschiedlichen Einwirkzeiten verwendet. Zum einen V2A-Beize und zum anderen Salpetersäure (HNO_3), jeweils für 2 min und 7 min.

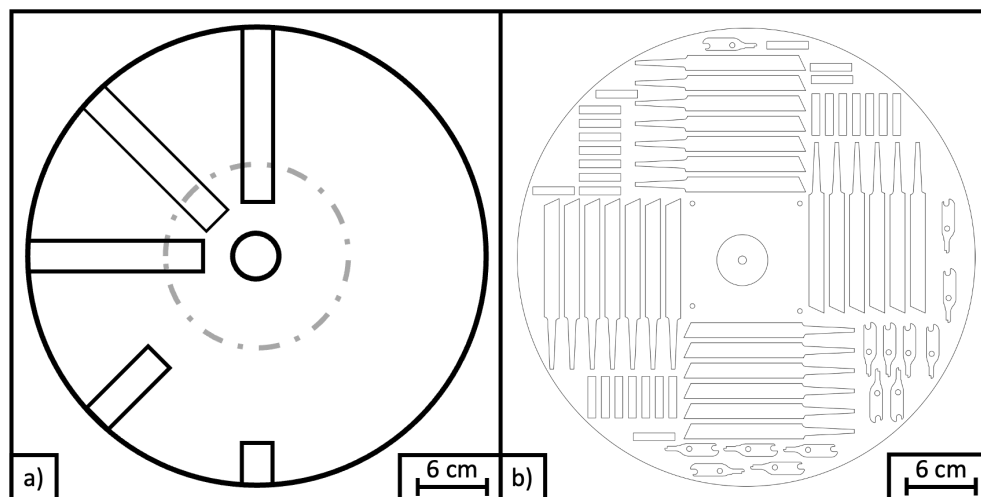


Abbildung 12: Zeichnungsableitungen zweier Schnittmuster für das heraustrennen von Proben und Halbzeugen aus Maschinenkreismessern. a) Das Schnittmuster für die Parameterstudie beim Laserschneiden. b) Ein Schnittmuster für die richtungsabhängige Entnahme von Halbzeugen für Drechselmeißel und Kerbschlagproben.

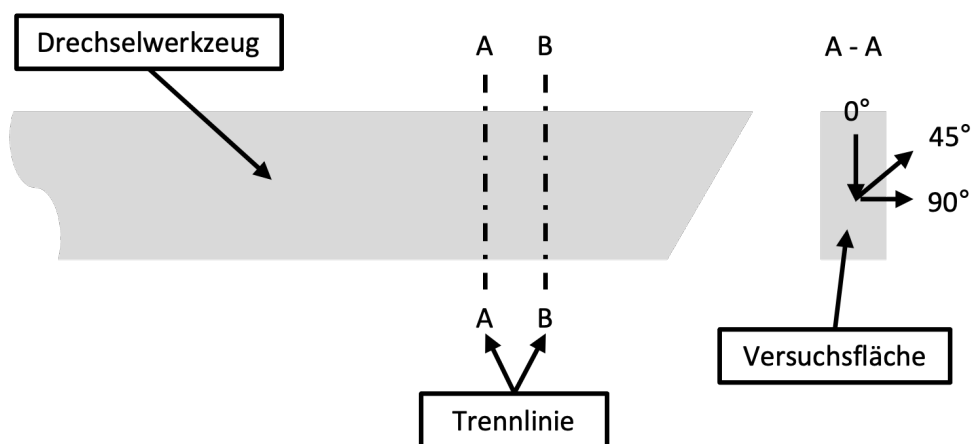


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Probenentnahme für die Einzelritzversuche. Aus allen Werkzeugen wurden Stücke herausgetrennt und die Querschnittsfläche als Versuchsfläche verwendet. Die Einzelritze wurden jeweils in 0°, 45° und 90° durchgeführt.

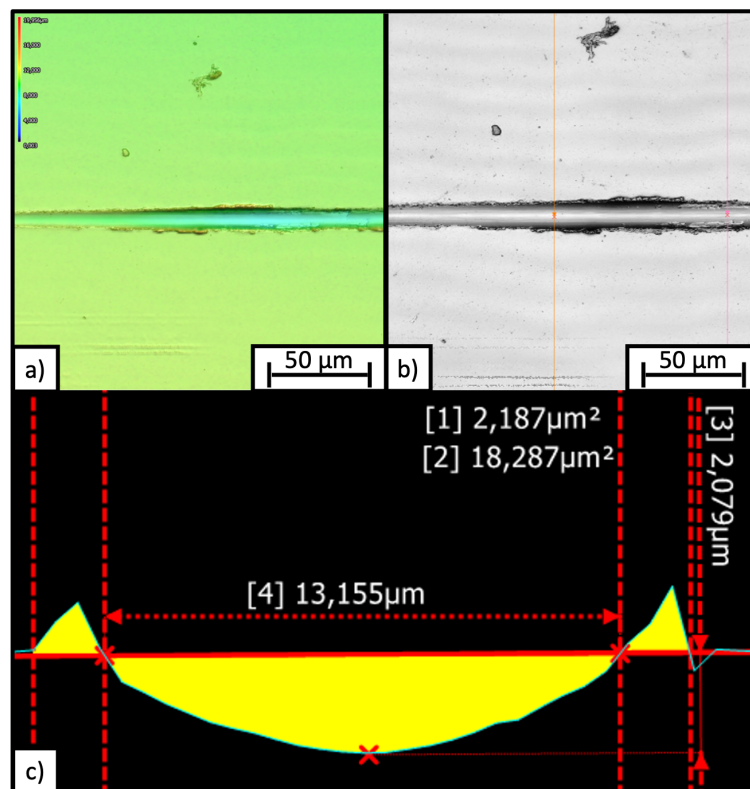


Abbildung 14: Vorgehen für die Auswertung der geometrischen Ritzkennwerte nach den Einzelritzversuchen in der Software FileAnalyzer. a) Eingefärbte topographische Aufnahme der Ritzspur. b) Darstellung der Laseransicht der selben Stelle der Ritzspur. Zu sehen sind die 100 μm großen Messabstände für die Ritzkennwerte. c) Querschnitt der Ritzspur mit den auszuwertenden Bereichen und den dazugehörigen Werten. [1] Obere Fläche [2] Untere Fläche [3] Ritztiefe [4] Ritzbreite

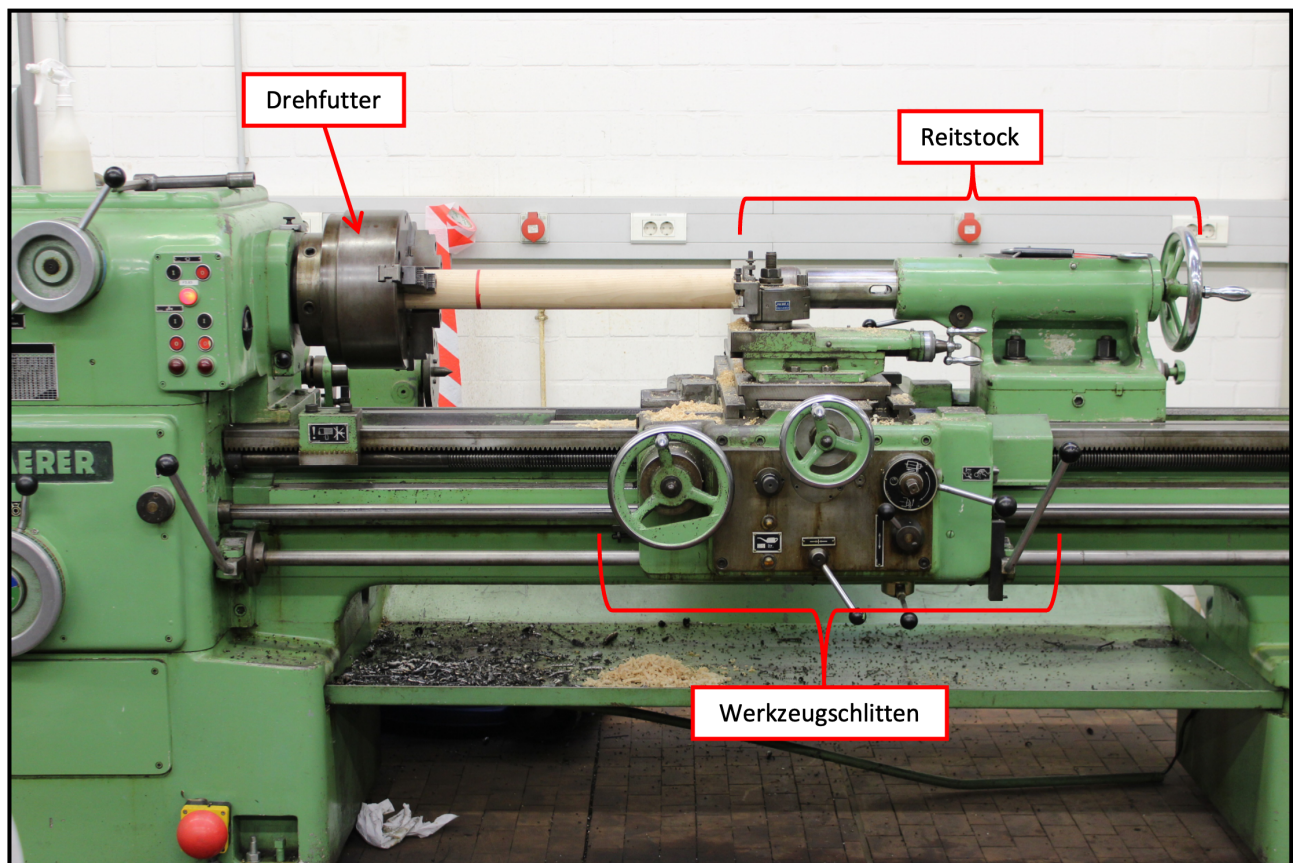


Abbildung 15: Aufbau des Verschleißversuches der konventionellen und Repurpose-Drehchselwerkzeuge. Verwendet wurde eine konventionelle Drehmaschine Firma Schaefer vom Typ UD500. Zu sehen ist das 650 mm lange Rundholz, dass zwischen dem Drehfutter und Reitstock eingespannt ist. Die Drehchselbeitel wurden über den Werkzeugschlitten entlang des Rundholzes verfahren.

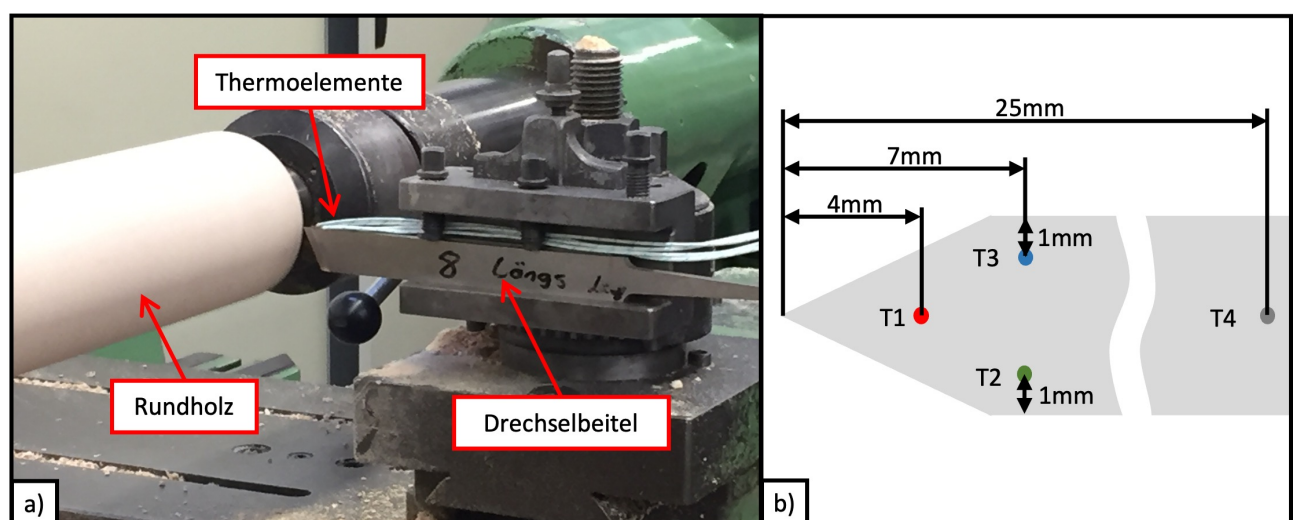


Abbildung 16: In Abbildung a) ist ein im Werkzeughalter eingespannter Drehchselbeitel zu sehen. Die Spitze des Drehchselbeitel ist unterhalb der Mitte des Rundholzes positioniert. Auf der Spitze sind die aufgebrauchten Thermoelemente zu sehen. b) Schematische Darstellung der jeweiligen Positionen der Thermoelemente T_1 bis T_4 .

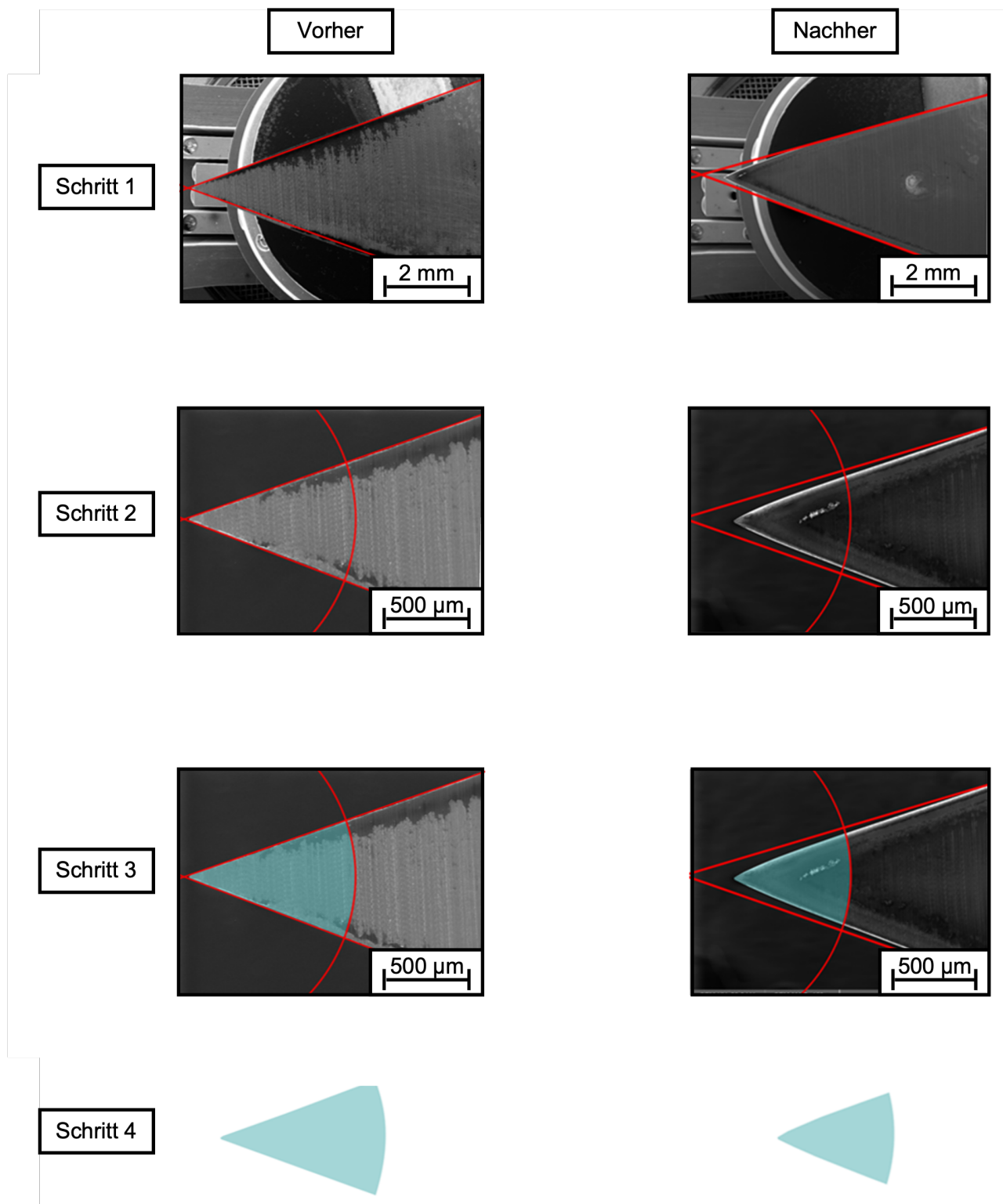


Abbildung 17: Schritte zur Bestimmung des Verschleißes an der Drechselmeißelspitze. Im ersten Schritt werden die Schneiden identifiziert und verlängert. Im zweiten Schritt wird auf den Schnittpunkt der beiden Geraden ein Kreis gelegt. Im dritten Schritt wird die tatsächliche Oberfläche der Spitze projiziert. Im vierten Schritt wird die reale Oberfläche gemessen. Dieses Vorgehen ist auf der linken Seite im Ausgangszustand und auf der rechten Seite im verschlissenen Zustand dargestellt.

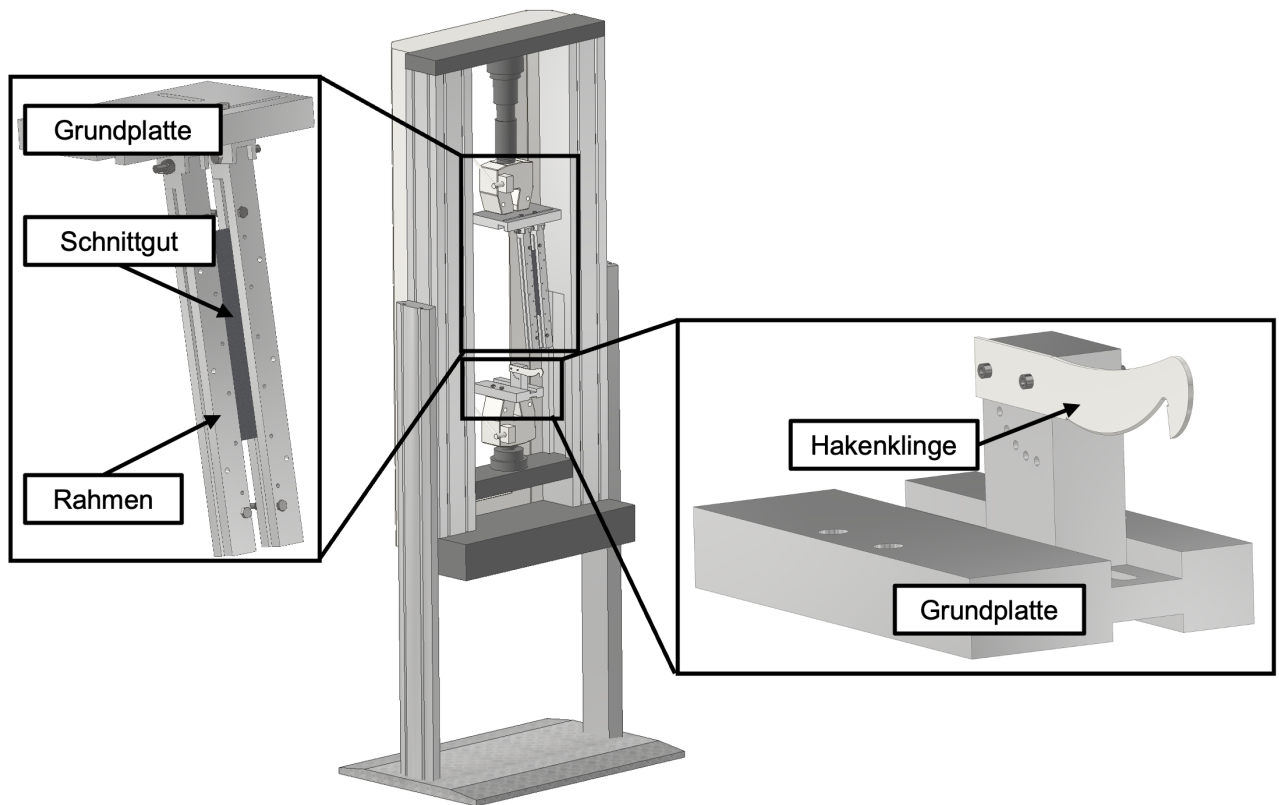


Abbildung 18: Aufbau des Schneidleistungstest der konventionellen und Repurpose-Hakenklinge. Zu sehen ein 3D-Modell der Universalprüfmaschine der Firma Zwick vom Typ Z050 mit dem entwickelten Versuchsaufbau. Auf der linken Seite ist der Rahmen dargestellt, in dass das Schnittgut eingespannt wird. Auf der rechten Seite ist die Aufnahme der Hakenklingen vergrößert dargestellt.

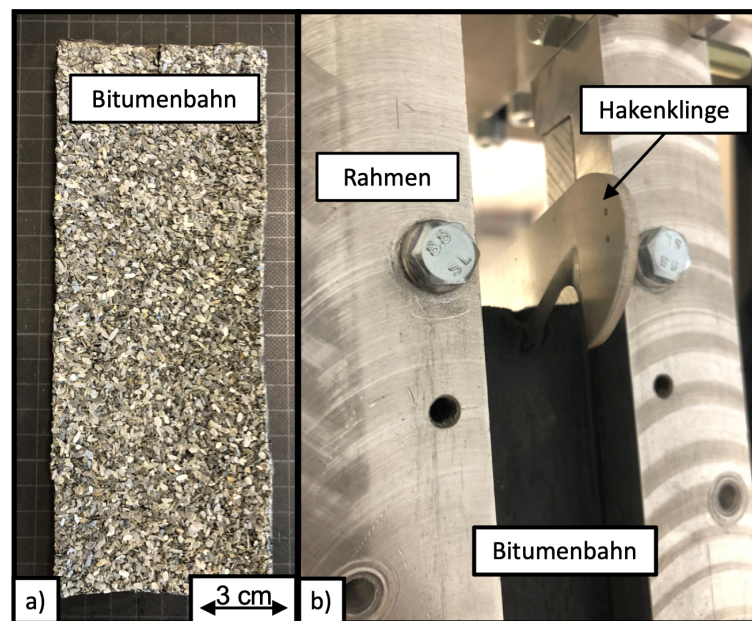


Abbildung 19: Abbildung a) zeigt die Bitumenbahn, die als Schnittgut bei den Schneidleistungstests eingesetzt worden ist. b) Startposition der Hakenklingen in der Einkerbung an der oberen Kante der Bitumenbahn.

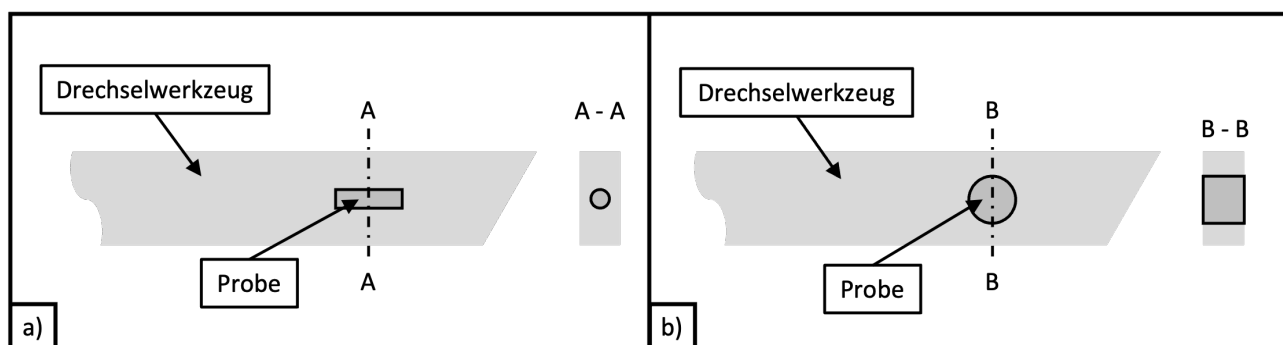


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Probenentnahme für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit. a) Die Proben wurden längs aus den verschiedenen Drechselmeißeln herausgetrennt und anschließend auf die benötigte Größe gefertigt. b) Die Proben wurden quer aus dem Drechselmeißel entnommen und anschließend auf die benötigte Größe gefertigt.

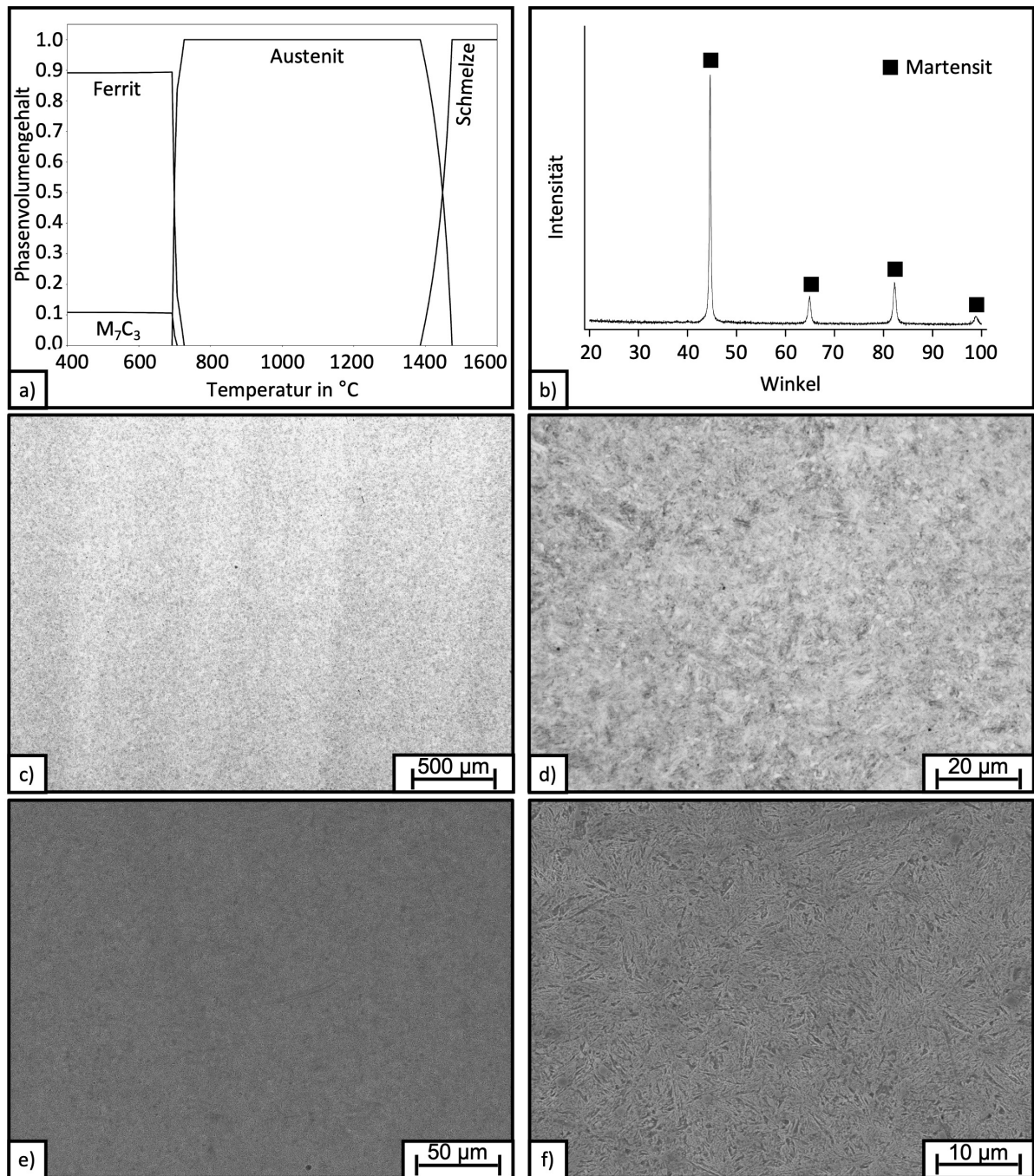


Abbildung 21: Zusammenfassung des 75Cr1 (1.2003) a) Thermodynamische Berechnung der vorliegenden Phasenmengen der ermittelten chemischen Zusammensetzung b) Diffraktogramm des 75Cr1 (1.2003) c) Lichtmikroskopische Aufnahme bei 50x-facher Vergrößerung d) Lichtmikroskopische Aufnahme bei 1000x-facher Vergrößerung e) SE-Aufnahme bei 1000-facher Vergrößerung f) SE-Aufnahme bei 5000-facher Vergrößerung

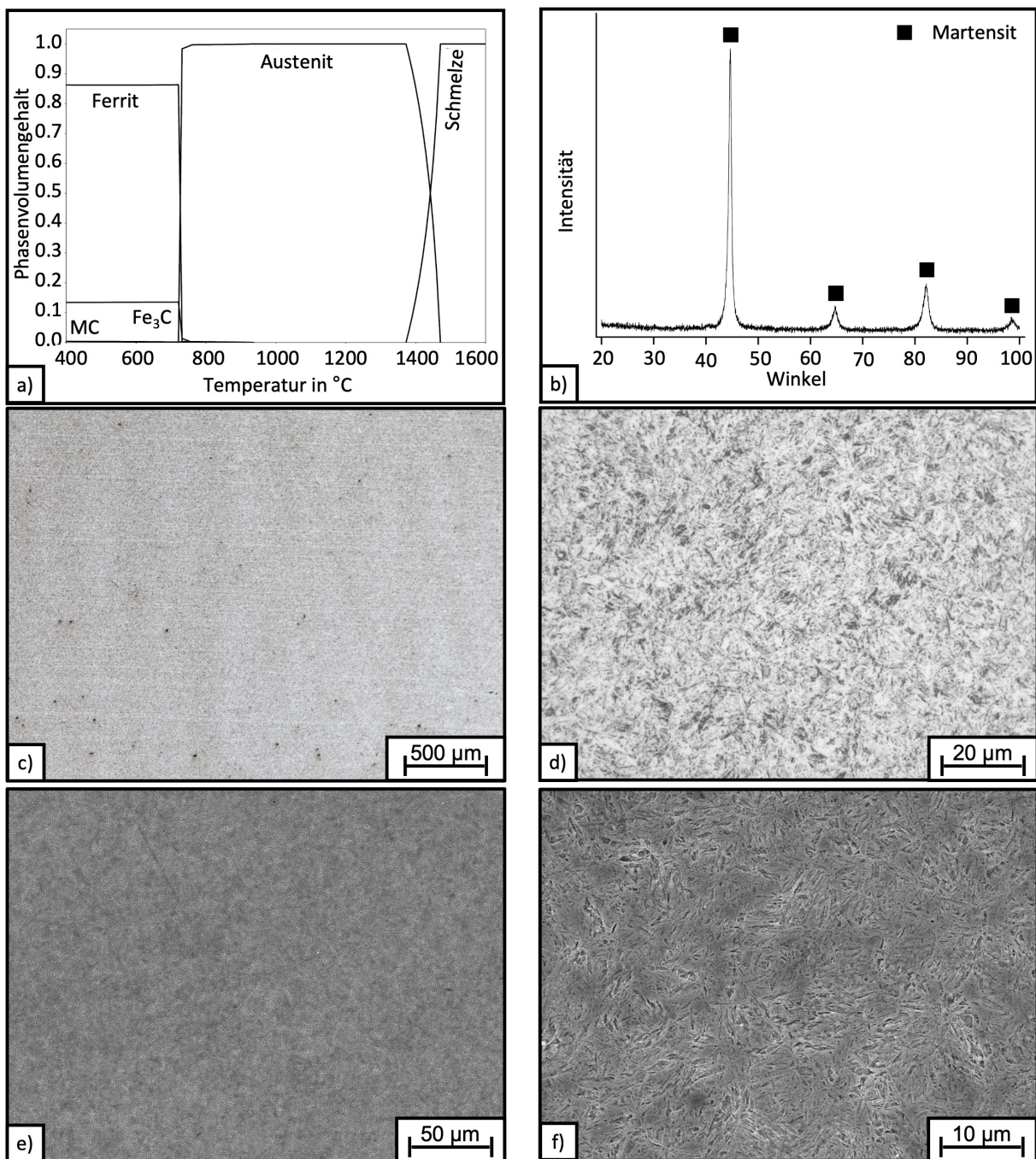


Abbildung 22: Zusammenfassung des 80CrV2 (1.2235) a) Thermodynamische Berechnung der vorliegenden Phasenmengen der ermittelten chemischen Zusammensetzung b) Diffraktogramm des 80CrV2 (1.2235) c) Lichtmikroskopische Aufnahme bei 50x-facher Vergrößerung d) Lichtmikroskopische Aufnahme bei 1000x-facher Vergrößerung e) SE-Aufnahme bei 1000-facher Vergrößerung f) SE-Aufnahme bei 5000-facher Vergrößerung

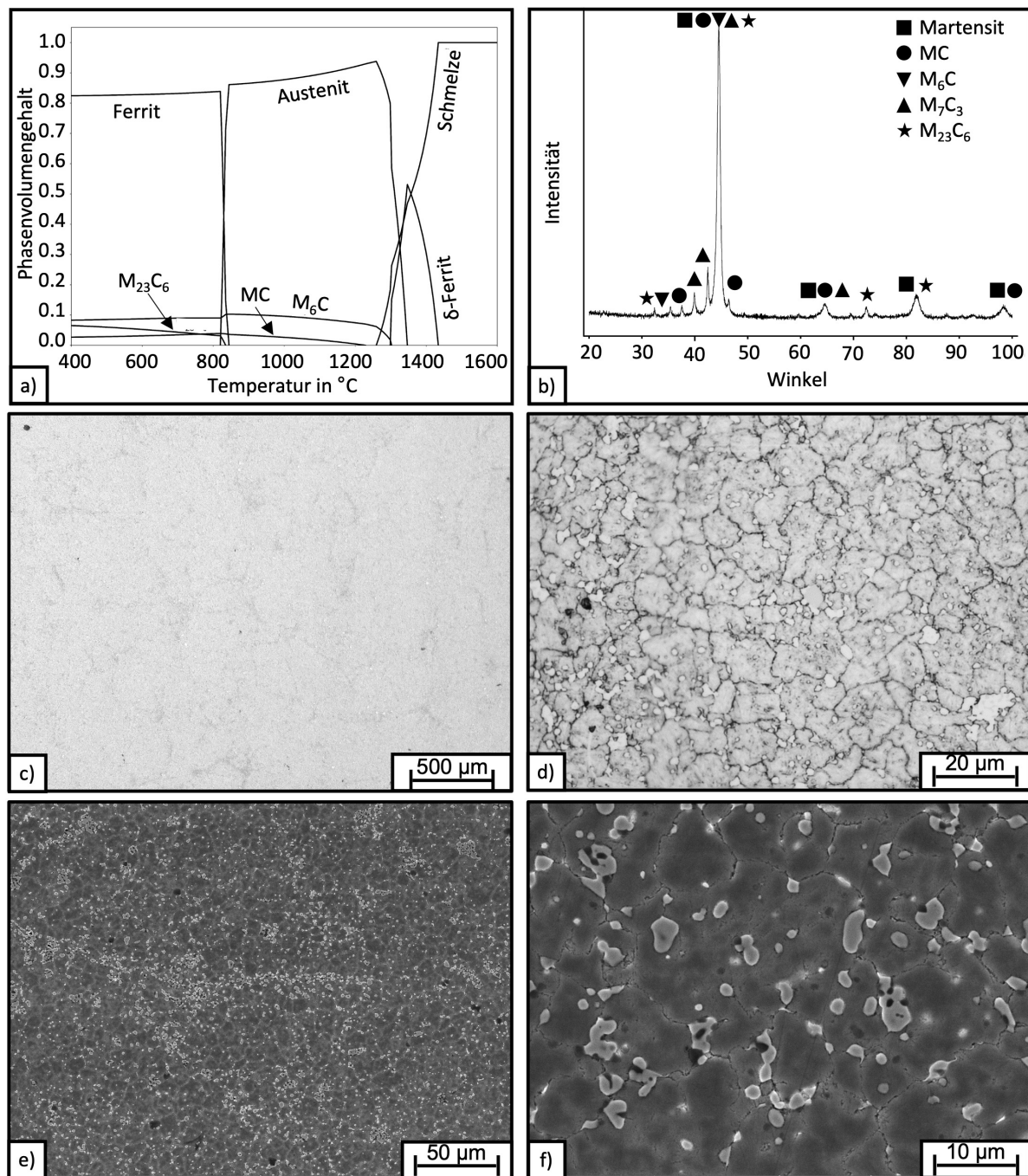


Abbildung 23: Zusammenfassung des HS6-5-2C (1.3343) a) Thermodynamische Berechnung der vorliegenden Phasenmengen der ermittelten chemischen Zusammensetzung b) Diffraktogramm des HS6-5-2C (1.3343) c) Lichtmikroskopische Aufnahme bei 50x-facher Vergrößerung d) Lichtmikroskopische Aufnahme bei 1000x-facher Vergrößerung e) SE-Aufnahme bei 1000-facher Vergrößerung f) SE-Aufnahme bei 5000-facher Vergrößerung

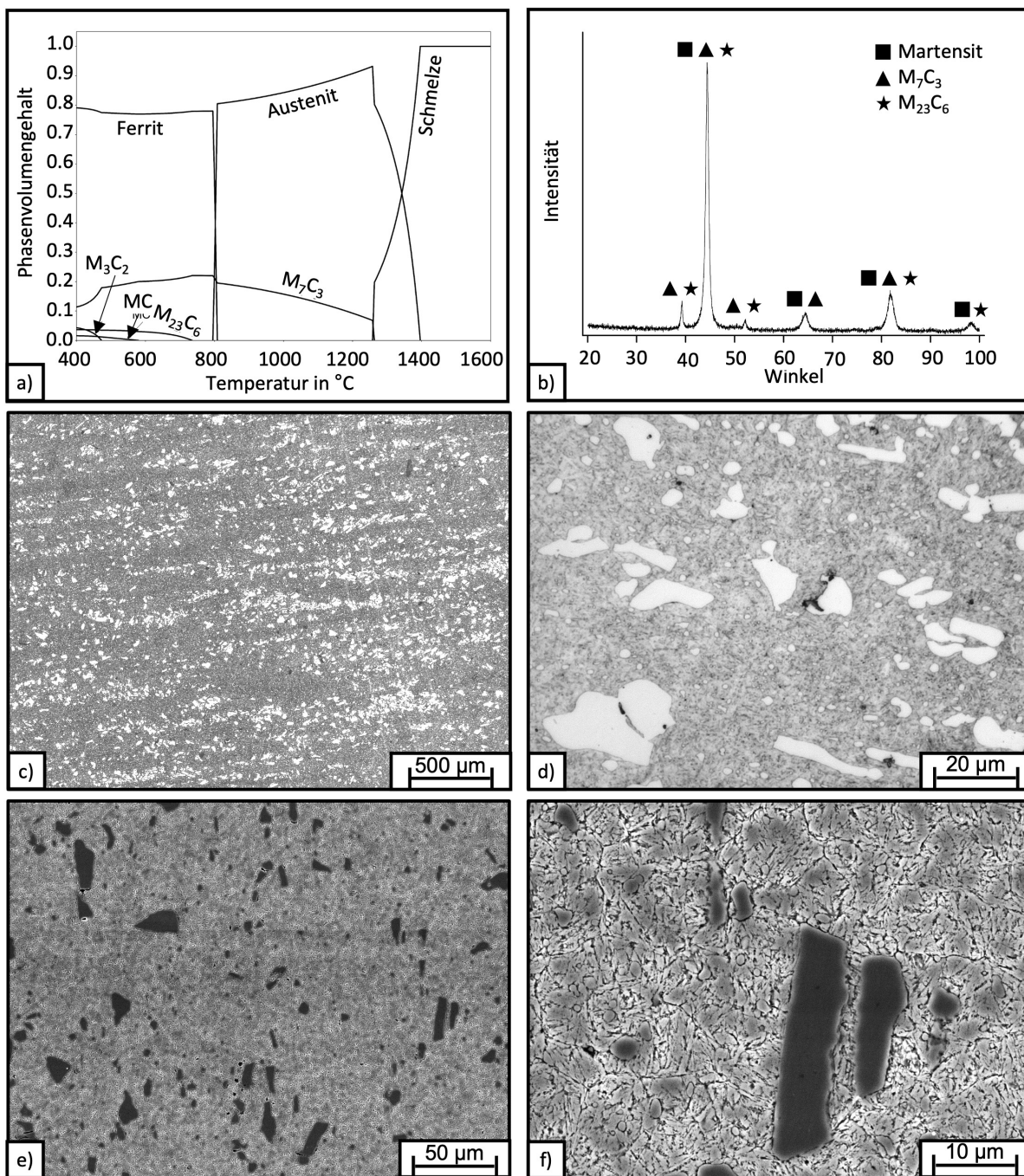


Abbildung 24: Zusammenfassung des X153CrMoV12 (1.2379) a) Thermodynamische Berechnung der vorliegenden Phasenmengen der ermittelten chemischen Zusammensetzung b) Diffraktogramm des X153CrMoV12 (1.2379) c) Lichtmikroskopische Aufnahme bei 50x-facher Vergrößerung d) Lichtmikroskopische Aufnahme bei 1000x-facher Vergrößerung e) SE-Aufnahme bei 1000-facher Vergrößerung f) SE-Aufnahme bei 5000-facher Vergrößerung

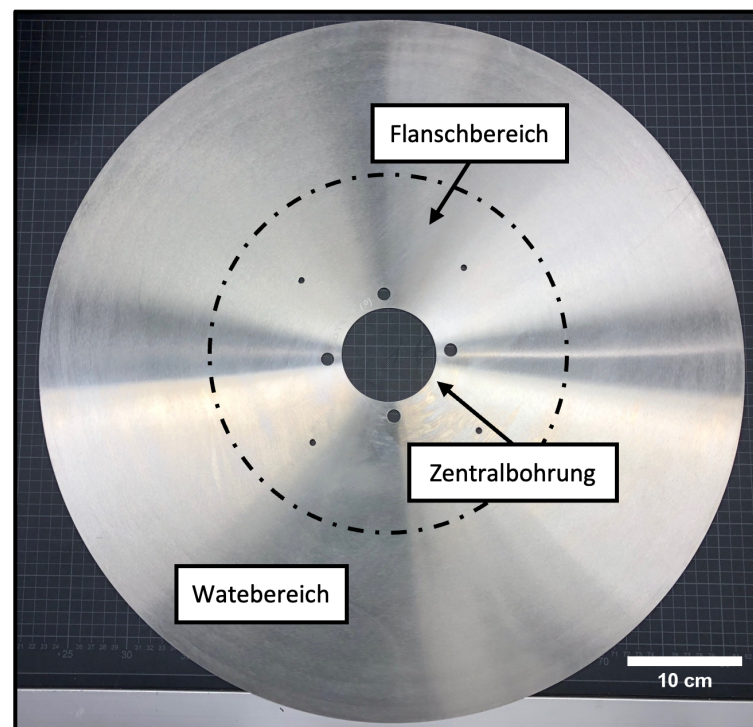


Abbildung 25: Wategeschliffene Maschinenkreismesser aus X155CrMoV12 (1.2379) mit einem 611 mm Durchmesser und 5 mm Materialstärke im Flanschbereich. Zu sehen ist die Zentralbohrung mit einem Durchmesser von 68 mm und den im Fertigungsprozess eingebrachten Spannungswalzringe im Watebereich.

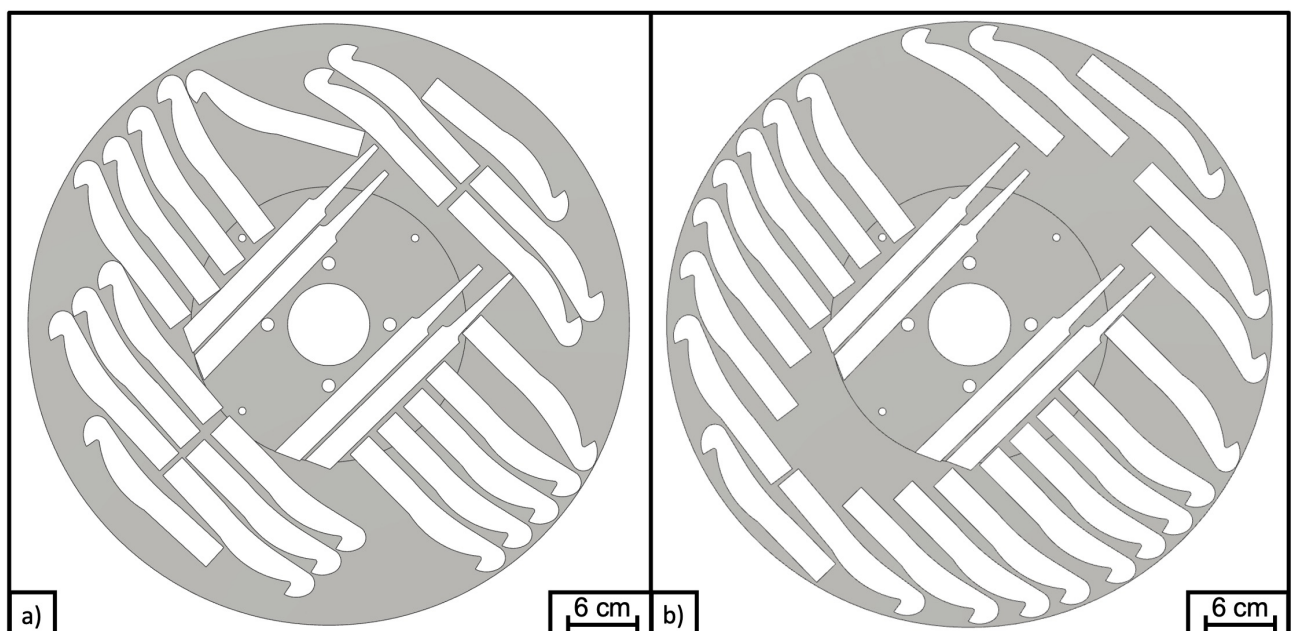


Abbildung 26: Dargestellt sind zwei Rondenausschnitt mit verschiedenen Nesting Anordnungen. In Abbildung a) ist eine Anordnung durchgeführt worden, bei der keine zusätzliche Nebenbedingung für nachfolgende Fertigungsschritte vorlag. Abbildung b) zeigt eine Anordnung mit der selben Anzahl an Rohlingen, jedoch sind die optimiert für nachfolgende Fertigungsschritte angeordnet.

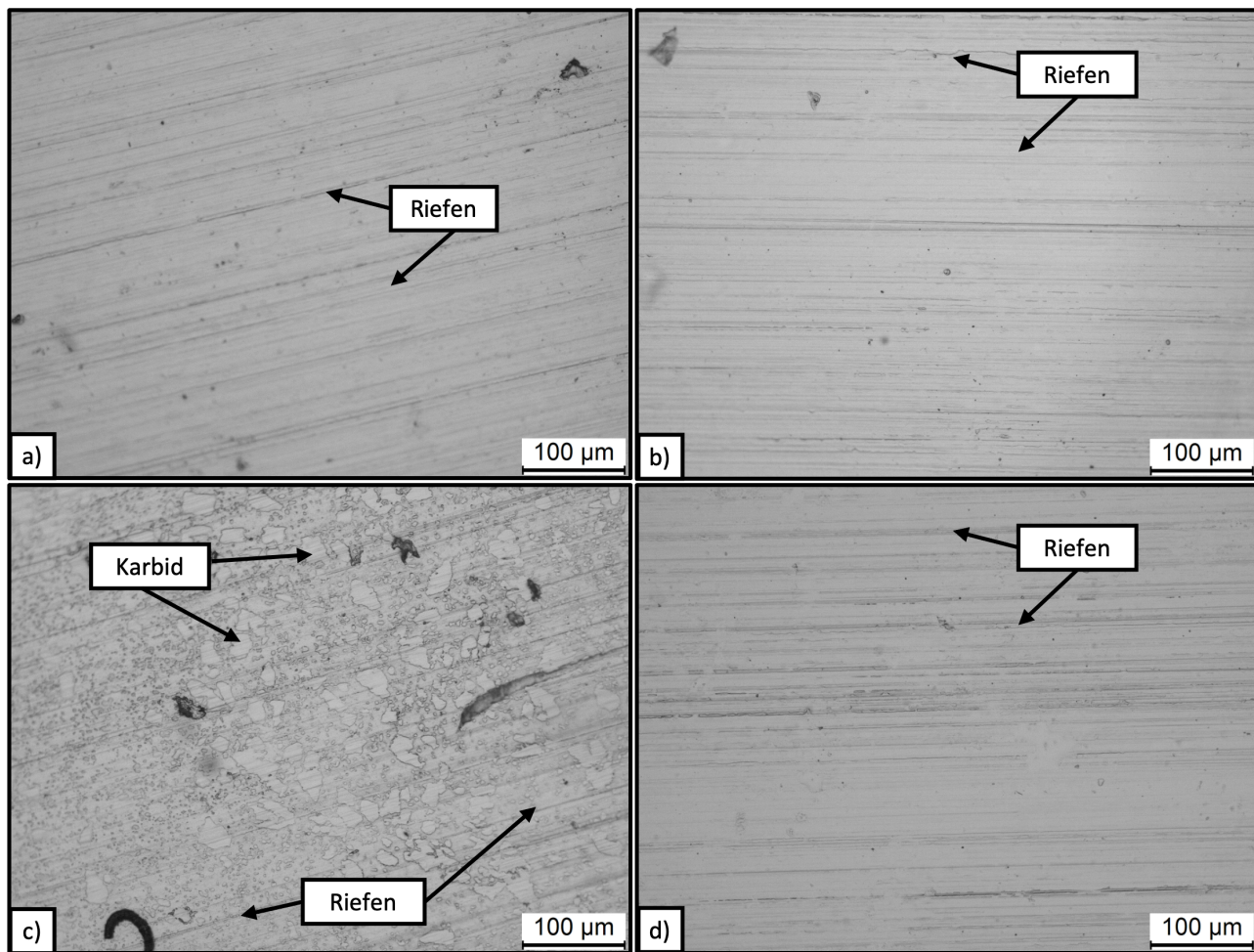


Abbildung 27: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Celluloseacetatfolien mit 200-facher Vergrößerung der unbehandelten Oberflächen. Zu sehen sind durch Fertigung und Nutzung hervorgerufene Riefen und teilweise Karbidumrisse. a) Abdruck Versuchsfeld 1 - Geätzt mit V2A-Beize für 2 min. b) Abdruck Versuchsfeld 2 - Geätzt mit Salpetersäure für 2 min. c) Abdruck Versuchsfeld 3 - Geätzt mit V2A-Beize für 7 min. d) Abdruck Versuchsfeld 4 - Geätzt mit Salpetersäure für 7 min.

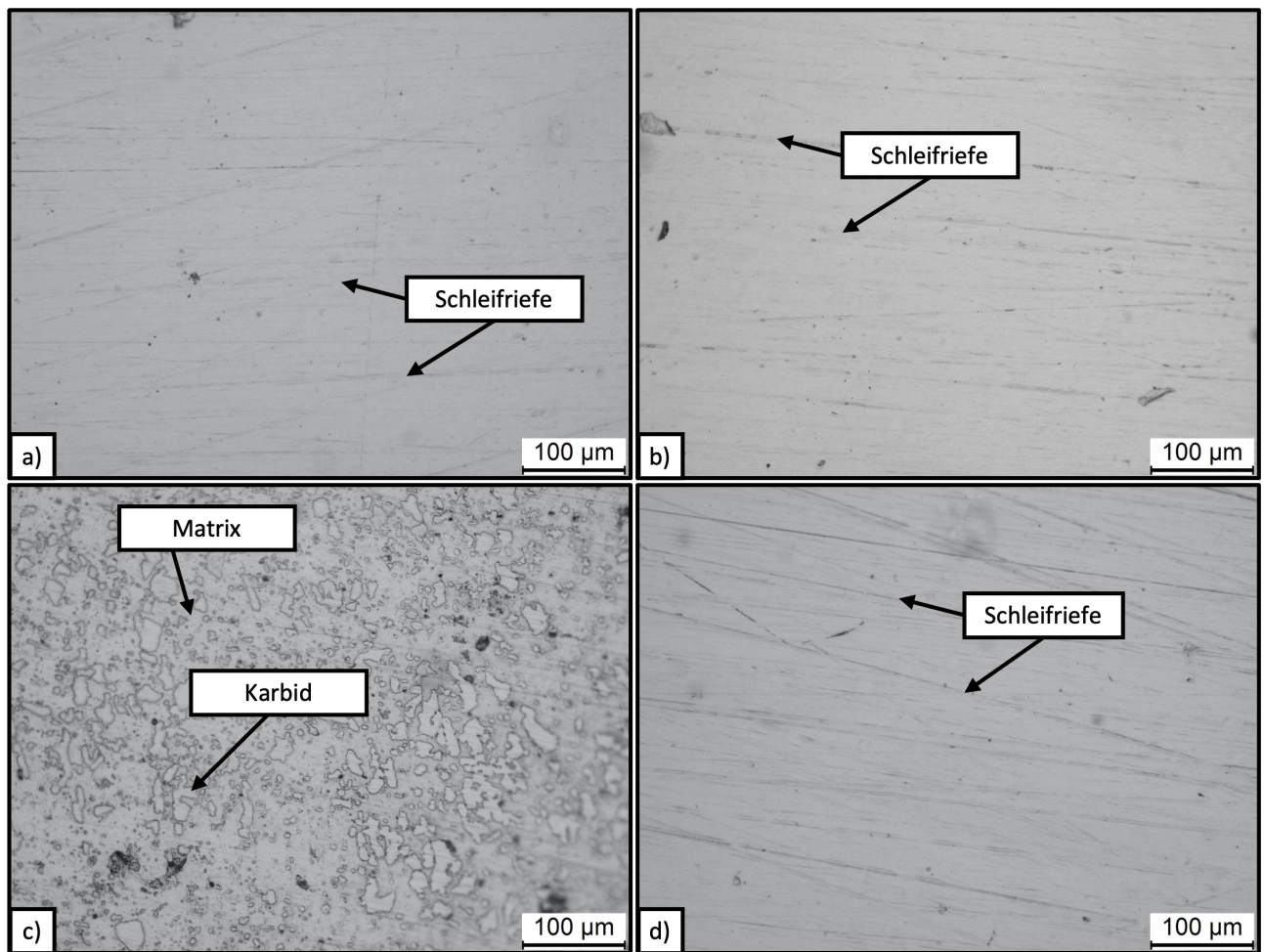


Abbildung 28: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Celluloseacetatfolien mit 200-facher Vergrößerung der mit SiC-Papier P500 Mesh (30 µm) geschliffenen Oberflächen. Zu sehen sind Schleifriefen und Karbidumrisse. a) Versuchsfeld 5 - Geätzt mit V2A-Beize für 2 min. b) Versuchsfeld 6 - Geätzt mit Salpetersäure für 2 min. c) Versuchsfeld 7 - Geätzt mit V2A-Beize für 7 min. d) Versuchsfeld 8 - Geätzt mit Salpetersäure für 7 min.

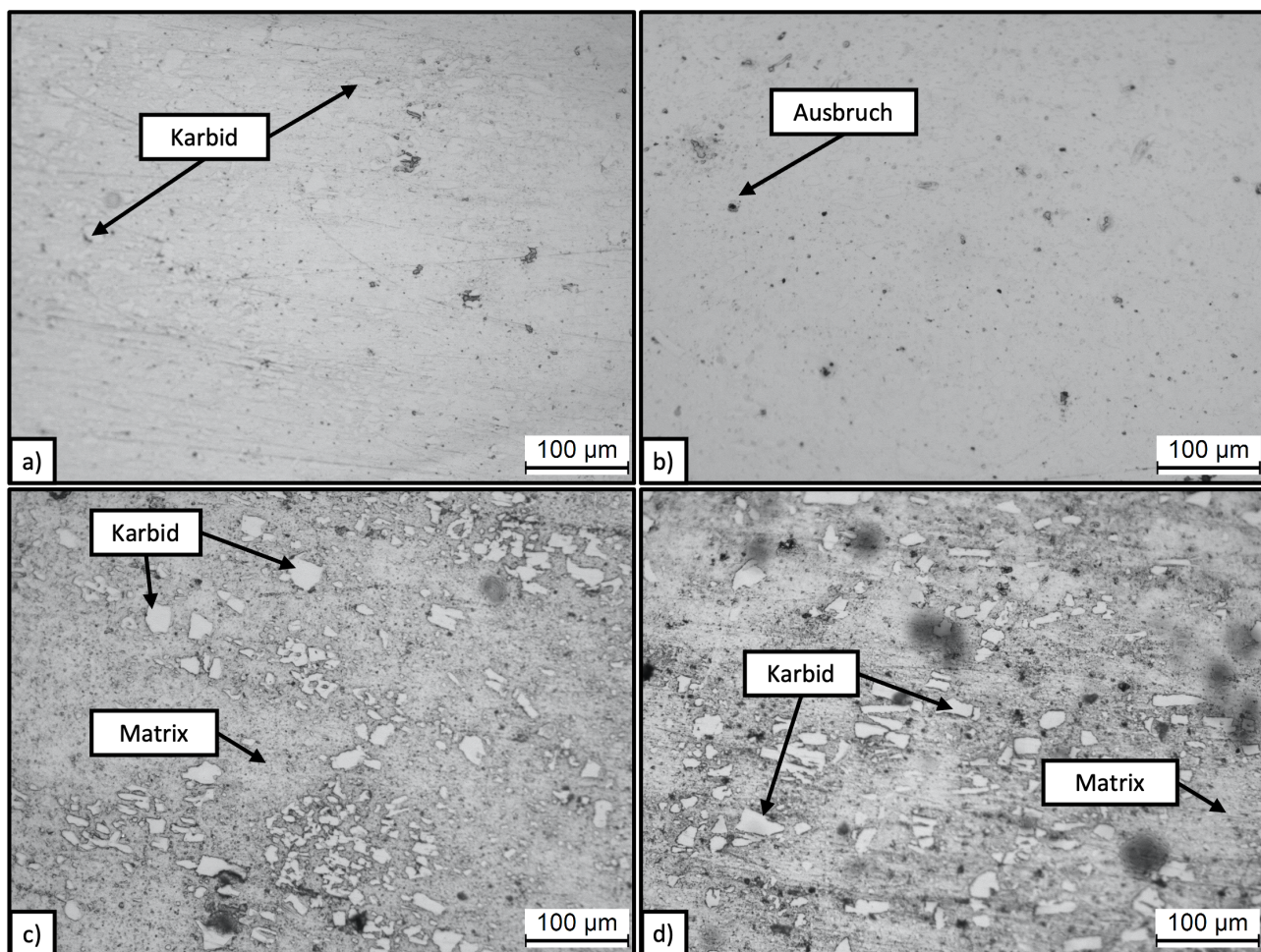


Abbildung 29: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Celluloseacetatfolien mit 200-facher Vergrößerung der mit SiC-Papier P1500 Mesh (10 µm) geschliffenen Oberflächen. Zu sehen sind Karbide und Präparationsfehler wie Ausbrüche zu sehen. a) Versuchsfeld 9 - Geätzt mit V2A-Beize für 2 min. b) Versuchsfeld 10 - Geätzt mit Salpetersäure für 2 min. c) Versuchsfeld 11 - Geätzt mit V2A-Beize für 7 min. d) Versuchsfeld 12 - Geätzt mit Salpetersäure für 7 min.

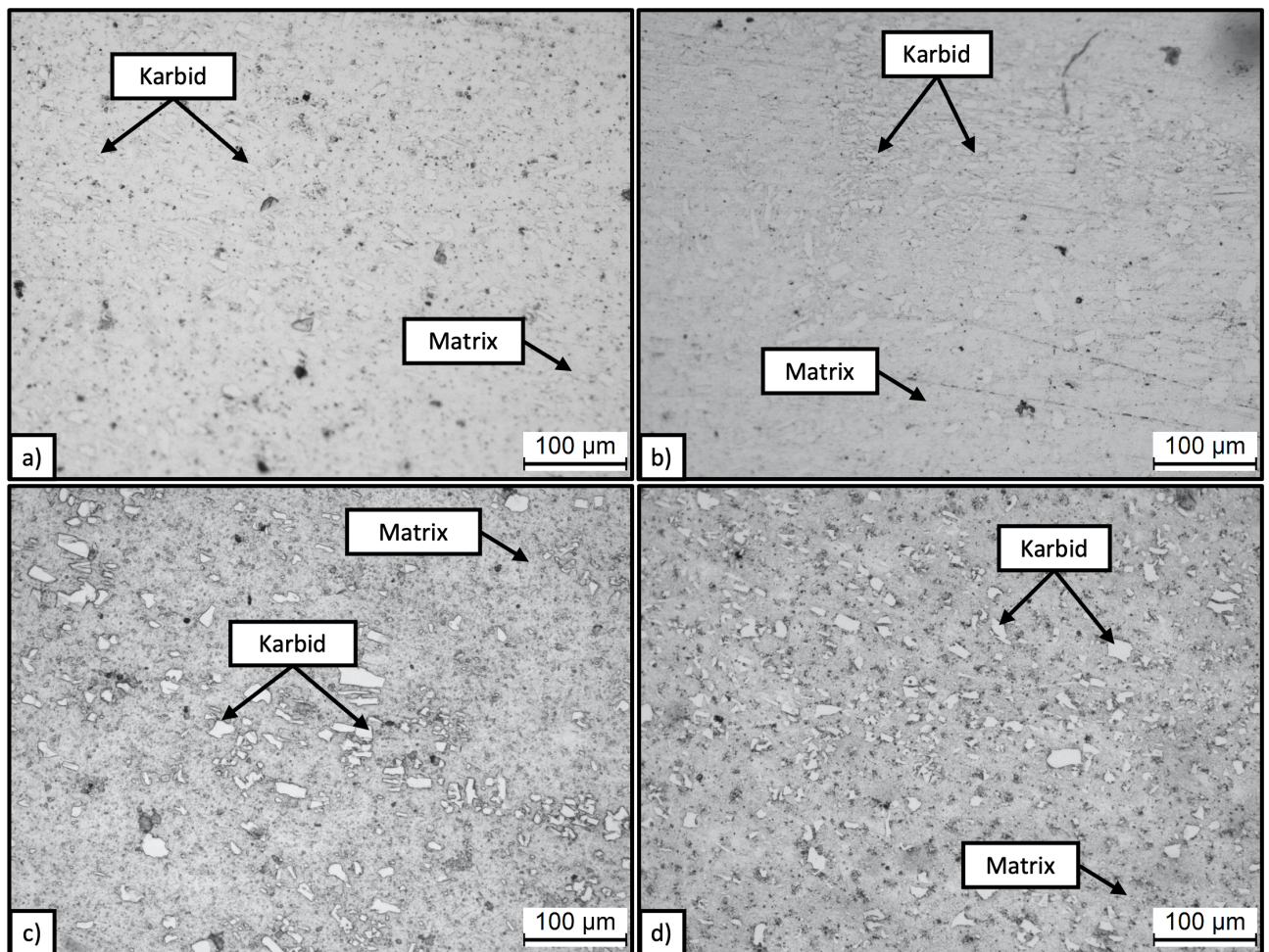


Abbildung 30: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Celluloseacetatfolien mit 200-facher Vergrößerung der mit 6 µm Diamantsuspension polierten Oberflächen. a) Versuchsfeld 13 - Geätzt mit V2A-Beize für 2 min. b) Versuchsfeld 14 - Geätzt mit Salpetersäure für 2 min. c) Versuchsfeld 15 - Geätzt mit V2A-Beize für 7 min. d) Versuchsfeld 16 - Geätzt mit Salpetersäure für 7 min.

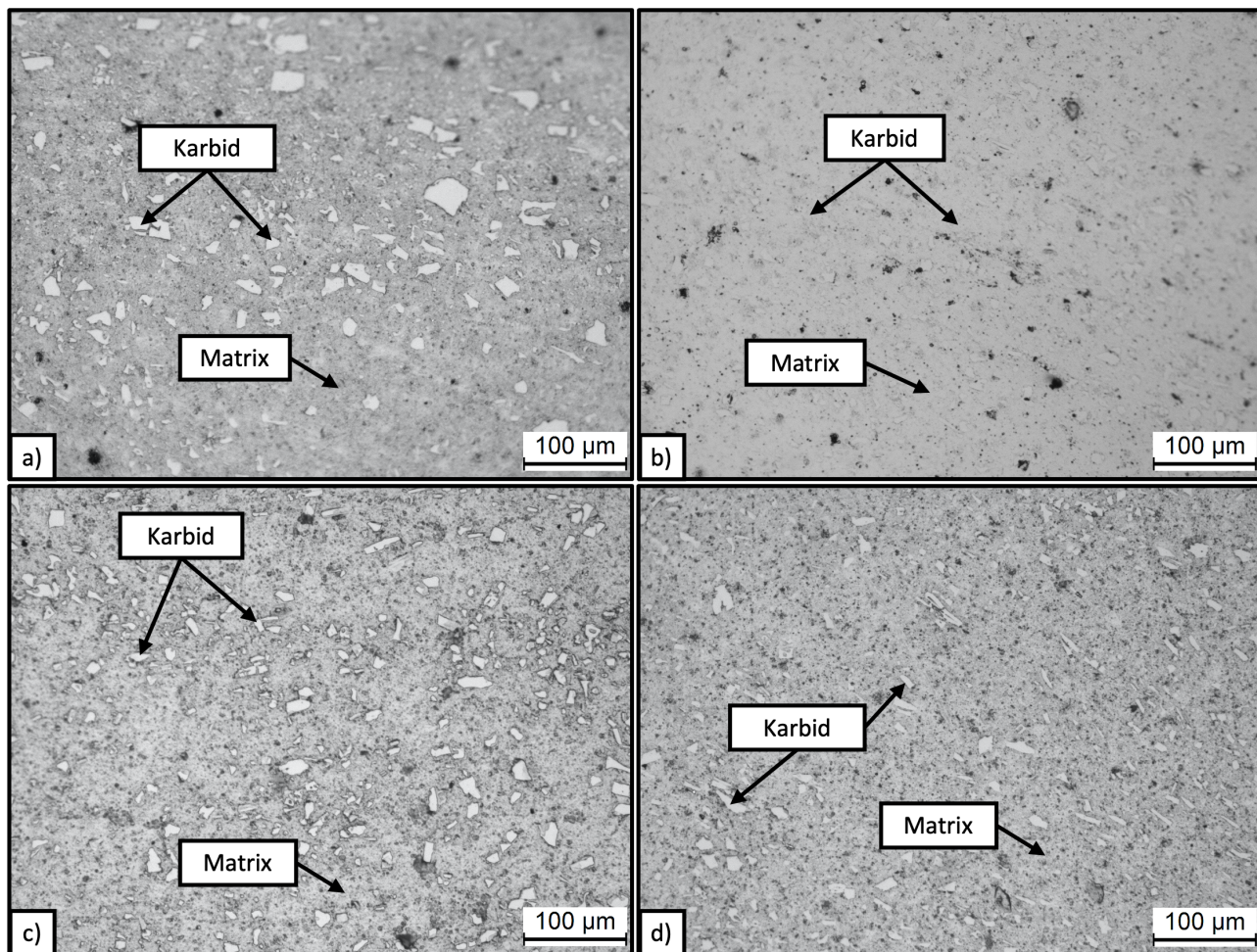


Abbildung 31: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Celluloseacetatfolien mit 200-facher Vergrößerung der mit 1 µm Diamantsuspension polierten Oberflächen. a) Versuchsfeld 17 - Geätzt mit V2A-Beize für 2 min. b) Versuchsfeld 18 - Geätzt mit Salpetersäure für 2 min. c) Versuchsfeld 19 - Geätzt mit V2A-Beize für 7 min. d) Versuchsfeld 20 - Geätzt mit Salpetersäure für 7 min.

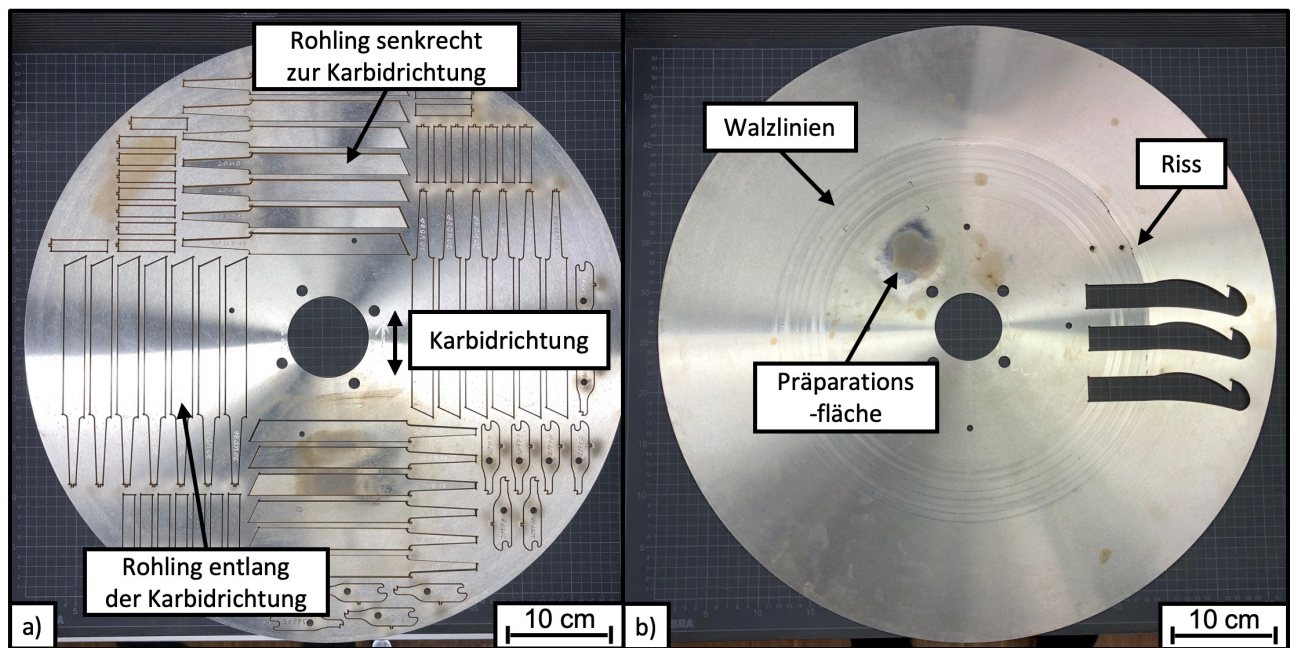


Abbildung 32: Ronden aus denen durch Wasserstrahlschneiden Halbzzeuge für Repurpose-Produkte herausgetrennt wurden. a) Eine planparallele Ronde aus denen unter anderem Halbzzeuge für Drechselmeißel entlang und senkrecht zur Karbidrichtung entnommen wurden. b) Eine wategeschliffene Ronde aus denen Hakenklingen für Repurpose-Pappreißmesser entnommen wurden. Zu sehen ist, dass ein Riss entlang der Spannungswalzzlinien verläuft.

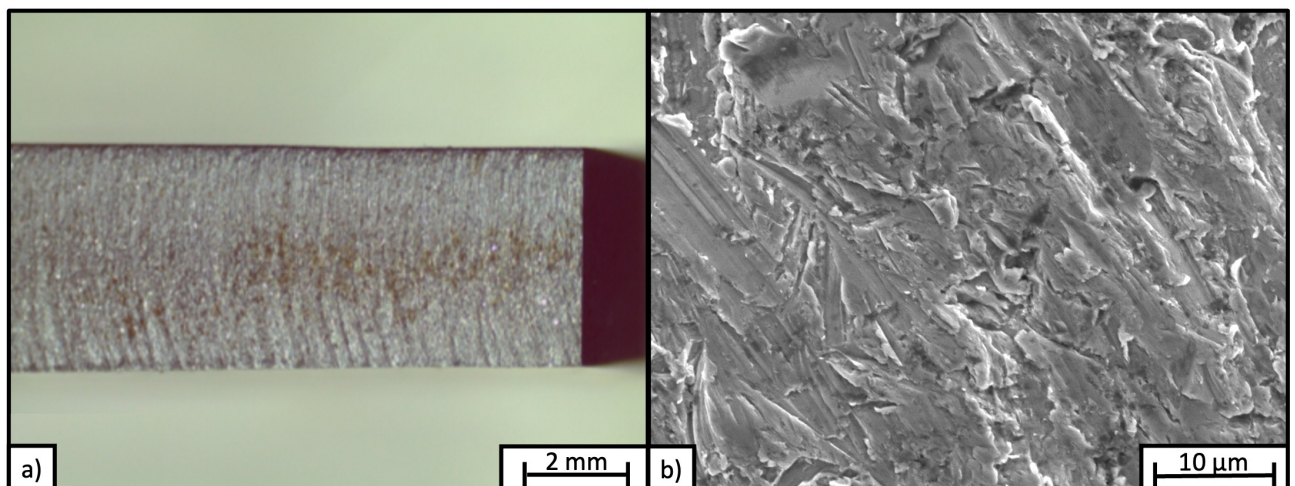


Abbildung 33: Schnittkante nachdem Wasserstrahlschneiden. a) Stereomikroskopische Aufnahme bei einer 10-fachen Vergrößerung b) Schnittfläche einer Wasserstrahl geschnittenen Probe bei 3000-facher Vergrößerung (REM)

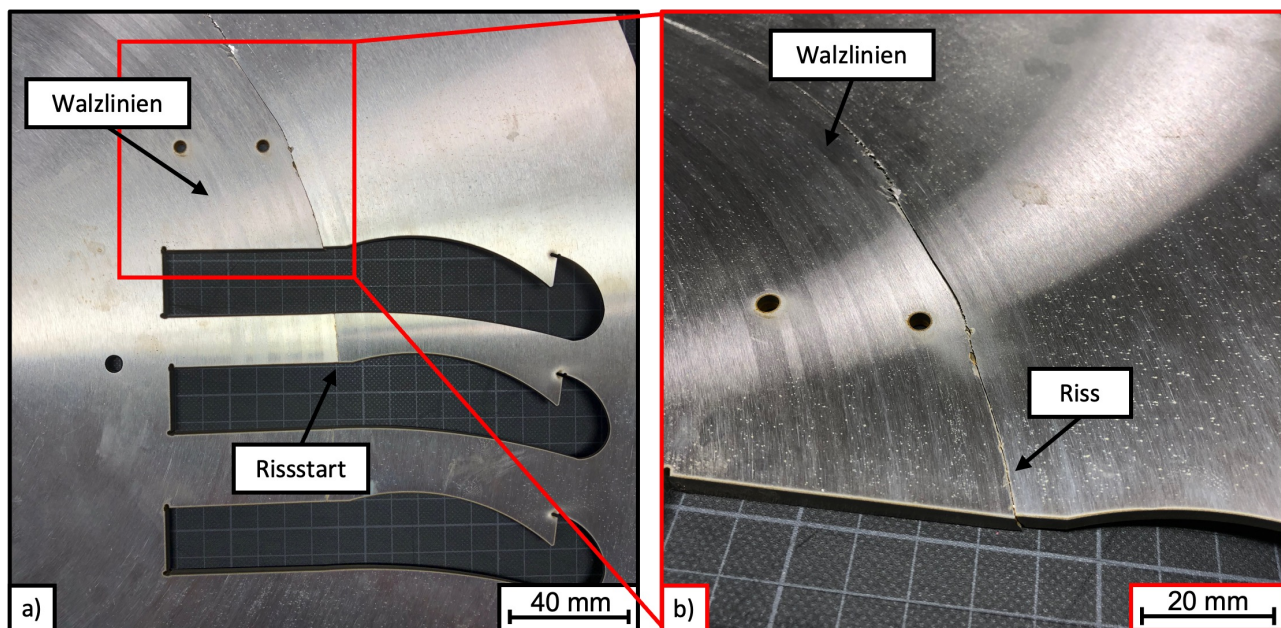


Abbildung 34: Vergrößerte Darstellung der Entnahmeposition an der wategeschliffenen Ronde. Zu sehen sind in a) die ausgeschnittenen Rohlinge der Hakenklinge und der dabei entstandene Riss. b) zeigt eine weitere Vergrößerung des Risses entlang der Spannungswalzlinien.

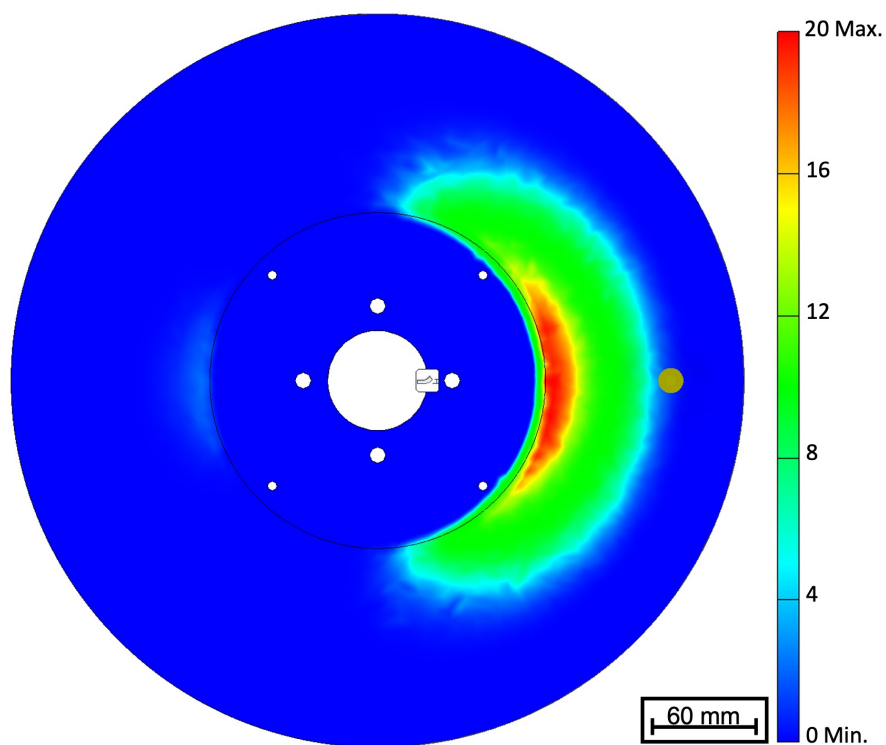


Abbildung 35: Ergebnis einer FEM-Berechnung des Wasserstrahlabrasivschneidens. Zu sehen ist, dass sich die Spannung von der krafteinleitenden Position sichelförmig ausbreitet. Die maximale Spannung liegt am Übergang des Watebereich zum Flanschbereich vor.

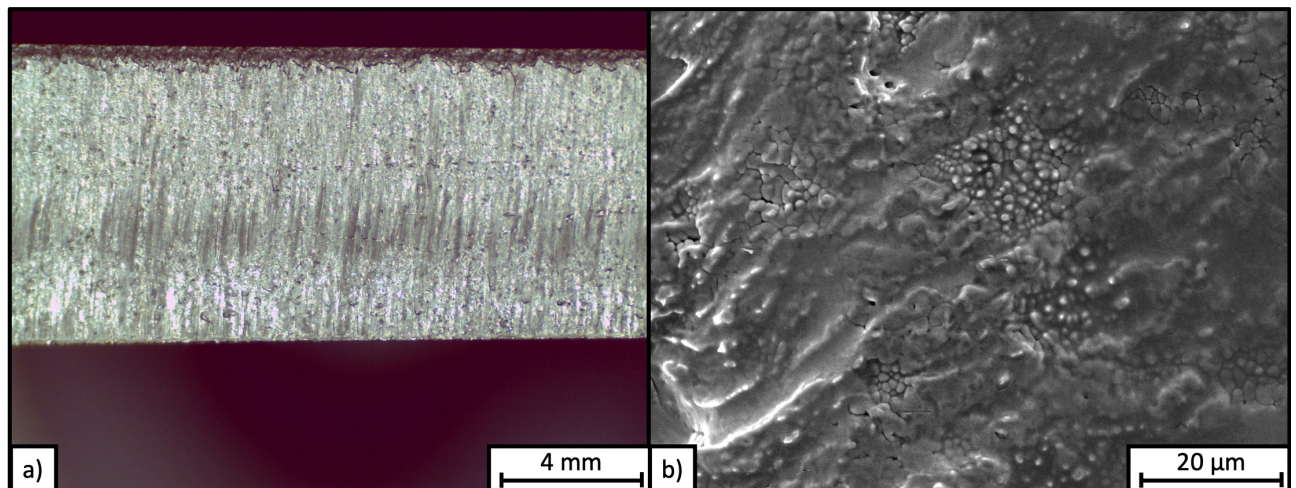


Abbildung 36: Die Abbildung zeigt die Schnittfläche einer Laserstrahl geschnittenen Probe. a) Die Schnittfläche als stereomikroskopische Aufnahme bei einer 10-fachen Vergrößerung und b) als rasterelektronenmikroskopische Aufnahme bei 3000-facher Vergrößerung. Auf der REM-Aufnahme sind Risse und Poren zu erkennen.

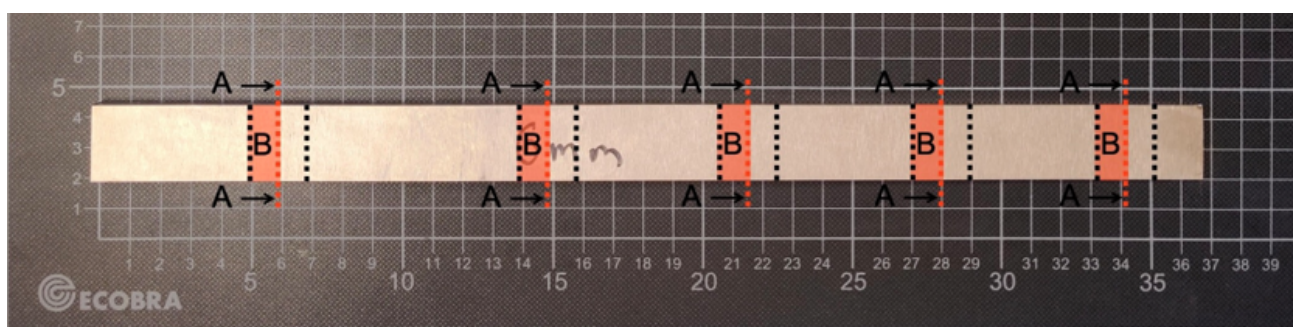


Abbildung 37: Übersichtsaufnahme einer über den Radius herausgetrennten Laserschneidprobe die mittels Laserleistung für 6 mm Materialstärke ausgeschnitten wurde. Analysiert wurde die wärmebeeinflusste Zone in der Querschnittsfläche A-A und in der rot markierten Fläche B.

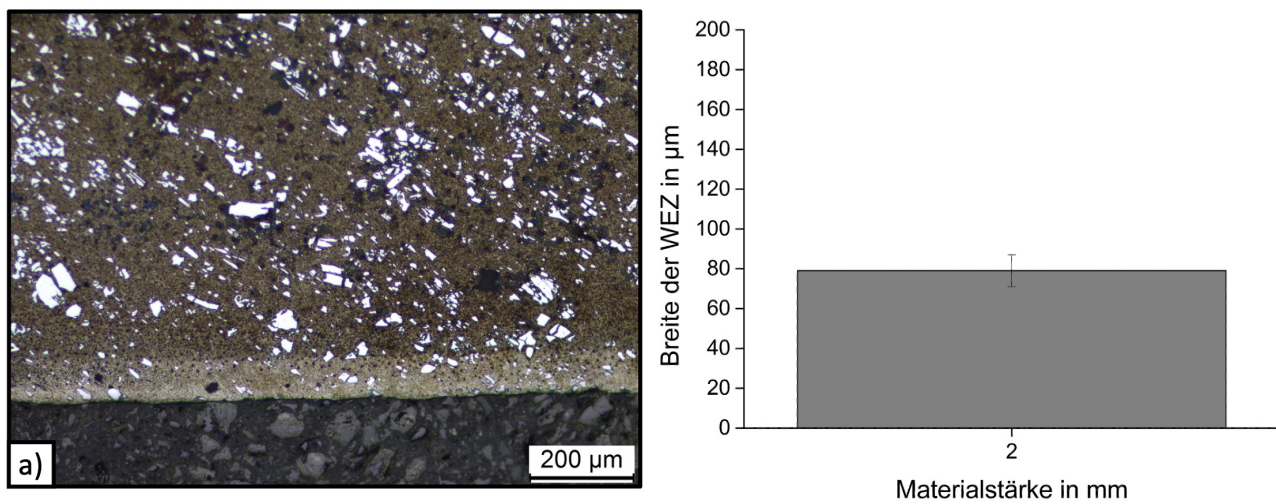


Abbildung 38: Lichtmikroskopische Aufnahmen der wärmebeeinflussten Randzone bei 100-facher Vergrößerung der Fläche B die mittels Laserleistung für 2 mm Materialstärke ausgeschnitten wurde.
a) Randzone bei 2 mm Materialstärke. Zusätzlich im Diagramm die gemessene Breite der wärmebeeinflussten Randzone über die Materialstärke.

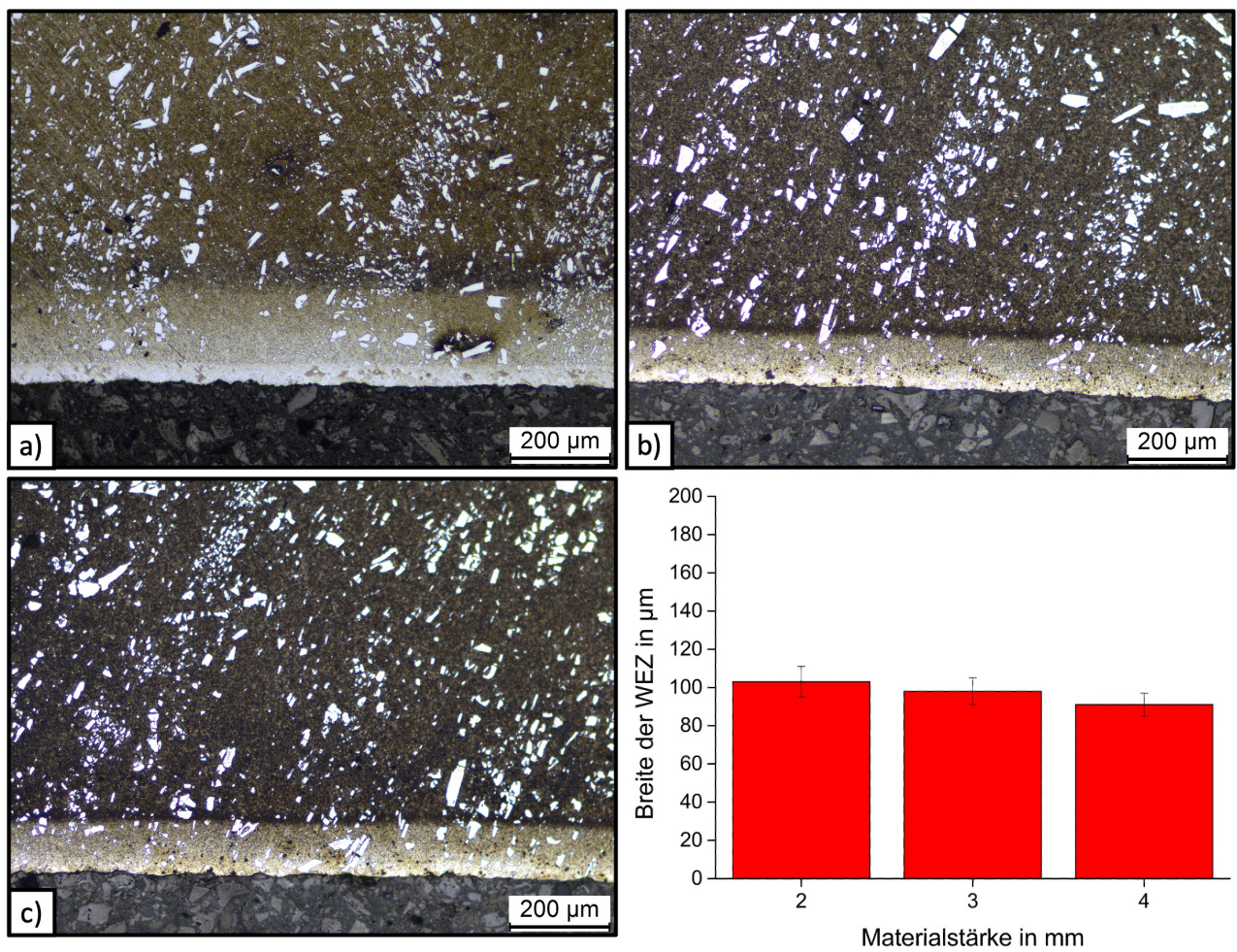


Abbildung 39: Lichtmikroskopische Aufnahmen der wärmebeeinflussten Randzonen bei 100-facher Vergrößerung der Fläche B die mittels Laserleistung für 4 mm Materialstärke ausgeschnitten wurde. a) Randzone bei 2 mm Materialstärke. b) Randzone bei 3 mm Materialstärke. c) Randzone bei 4 mm Materialstärke. Zusätzlich im Diagramm der gemessenen Breiten der wärmebeeinflussten Randzonen über die Materialstärke.

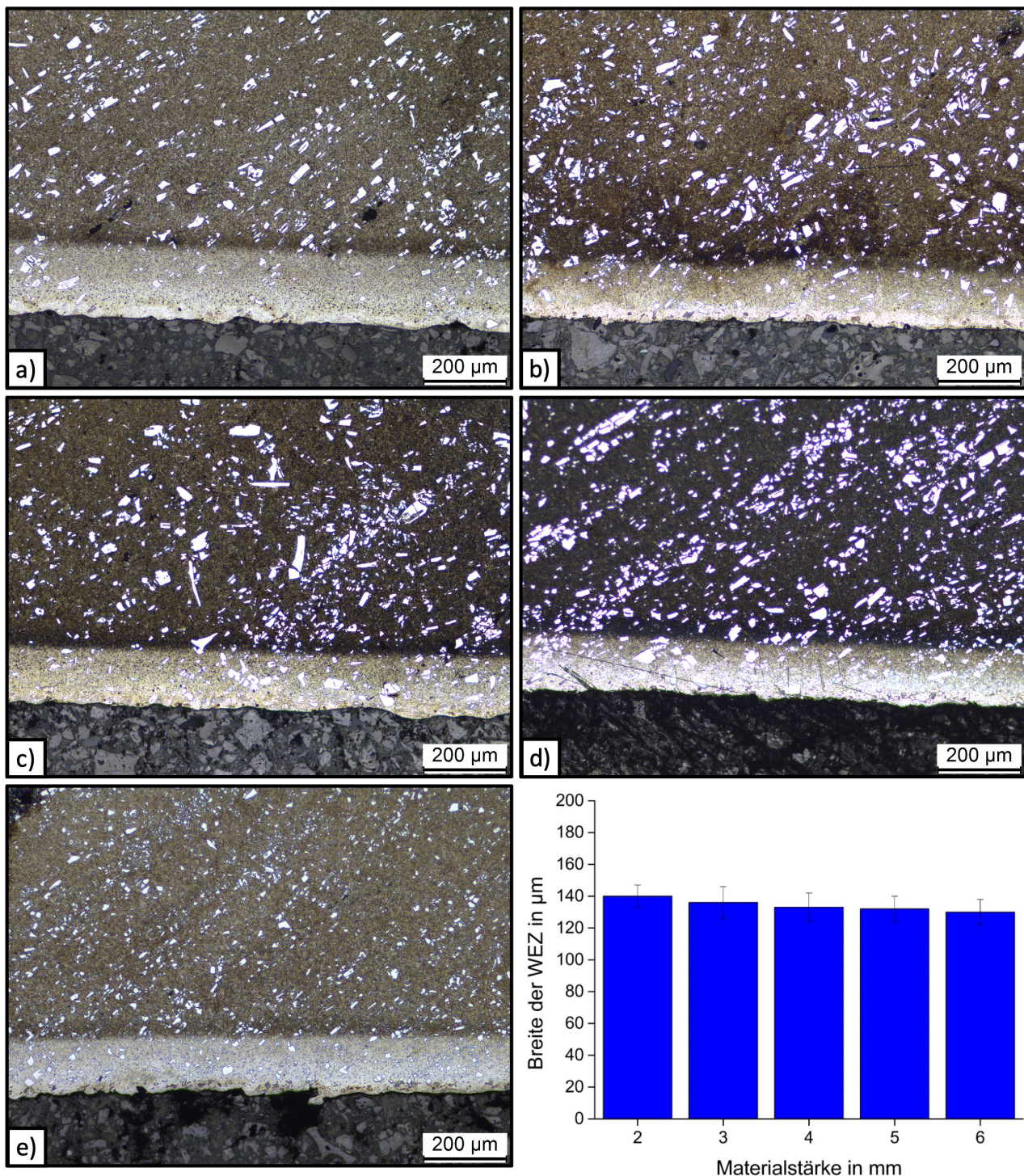


Abbildung 40: Lichtmikroskopische Aufnahmen der wärmebeeinflussten Randzonen bei 100-facher Vergrößerung der Fläche B die mittels Laserleistung für 6 mm Materialstärke ausgeschnitten wurde. a) Randzone bei 2 mm Materialstärke. b) Randzone bei 3 mm Materialstärke. c) Randzone bei 4 mm Materialstärke. d) Randzone bei 5 mm Materialstärke. e) Randzone bei 6 mm Materialstärke. Zusätzlich im Diagramm der gemessenen Breiten der wärmebeeinflussten Randzonen über die Materialstärke.

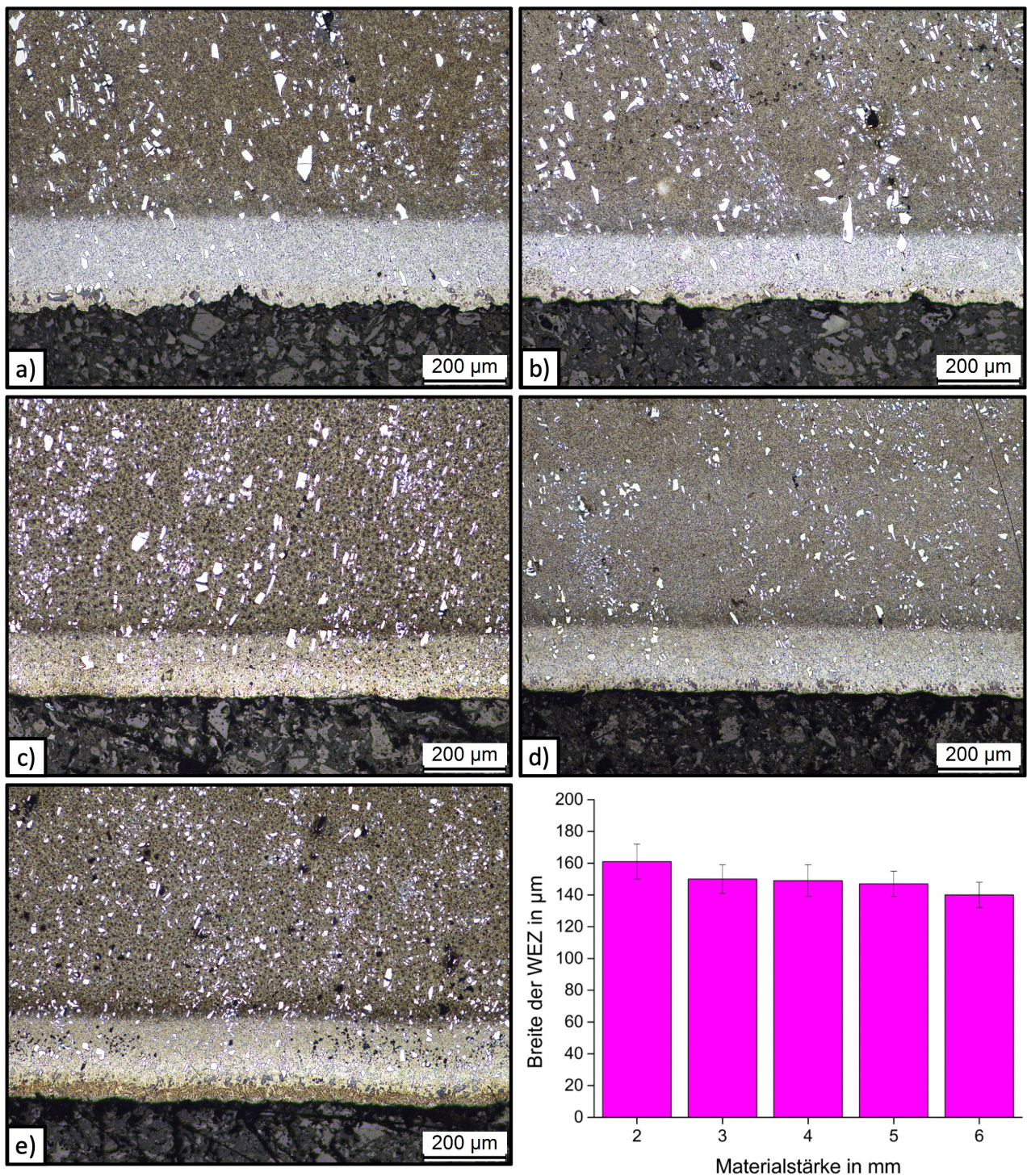


Abbildung 41: Lichtmikroskopische Aufnahmen der wärmebeeinflussten Randzonen bei 100-facher Vergrößerung der Fläche B die mittels Laserleistung für 8 mm Materialstärke ausgeschnitten wurde. a) Randzone bei 2 mm Materialstärke. b) Randzone bei 3 mm Materialstärke. c) Randzone bei 4 mm Materialstärke. d) Randzone bei 5 mm Materialstärke. e) Randzone bei 6 mm Materialstärke. Zusätzlich im Diagramm der gemessenen Breiten der wärmebeeinflussten Randzonen über die Materialstärke.

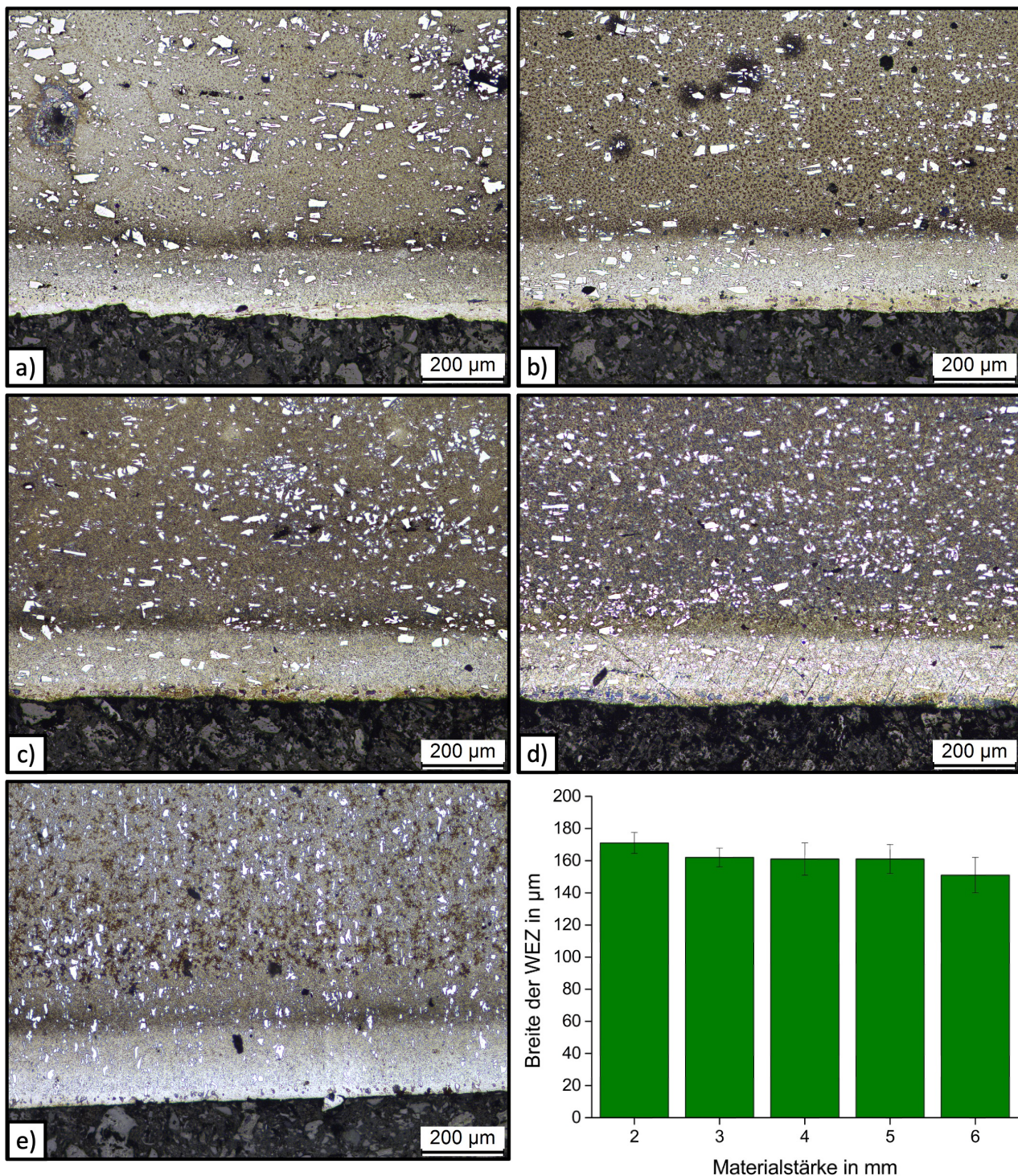


Abbildung 42: Lichtmikroskopische Aufnahmen der wärmebeeinflussten Randzonen bei 100-facher Vergrößerung der Fläche B die mittels Laserleistung für 10 mm Materialstärke ausgeschnitten wurde. a) Randzone bei 2 mm Materialstärke. b) Randzone bei 3 mm Materialstärke. c) Randzone bei 4 mm Materialstärke. d) Randzone bei 5 mm Materialstärke. e) Randzone bei 6 mm Materialstärke. Zusätzlich im Diagramm der gemessenen Breiten der wärmebeeinflussten Randzonen über die Materialstärke.

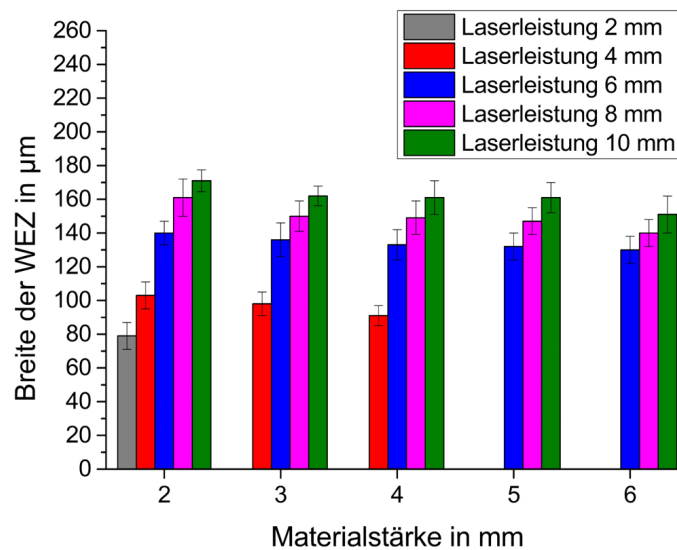


Abbildung 43: Aufgetragen ist die gemessene Breite der wärmebeeinflussten Randzonen über die Materialstärke unter Verwendung der Materialkarte des X153CrMoV12 (1.2379) mit verschiedenen Laserleistungen für entsprechende Materialstärken. Zu sehen ist, dass die Breite der Wärmeeinflusszone mit steigender Materialstärke abnimmt. Die geringste Wärmeeinflusszone liegt dann vor, wenn die Laserleistung der Materialstärke angepasst ist.

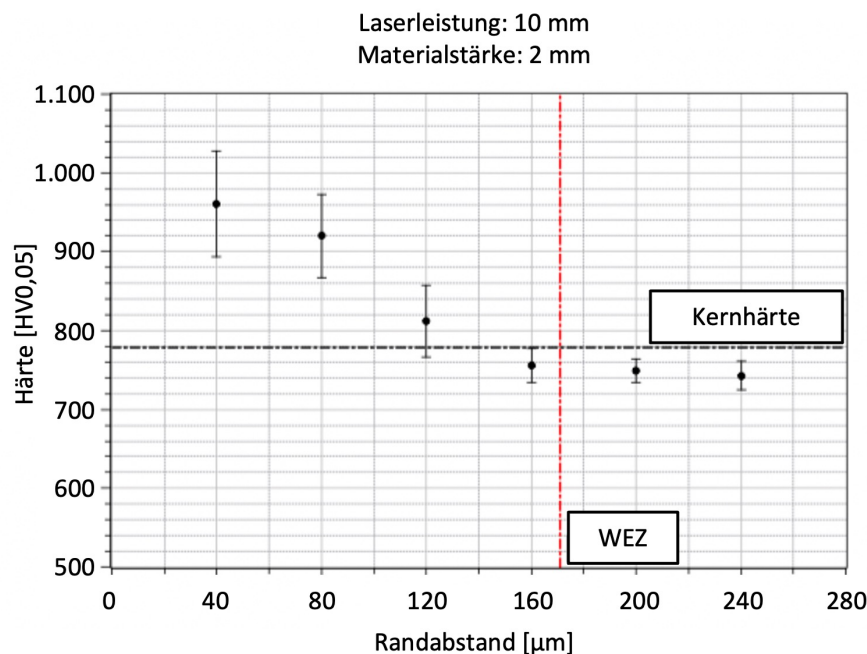


Abbildung 44: Die Abbildung zeigt den Härteverlauf der Probe 10 2 mit einem Randabstand von 40 µm bis 240 µm. Die senkrechte rote Strichpunktlinie kennzeichnet die Breite der optisch bestimmten Wärmeeinflusszone. Es ist zu sehen, dass im Randbereich eine Aufhärtung des Materials stattgefunden hat. Die Kernhärte des Materials wird im Bereich der optisch bestimmten Einflusszone erreicht.

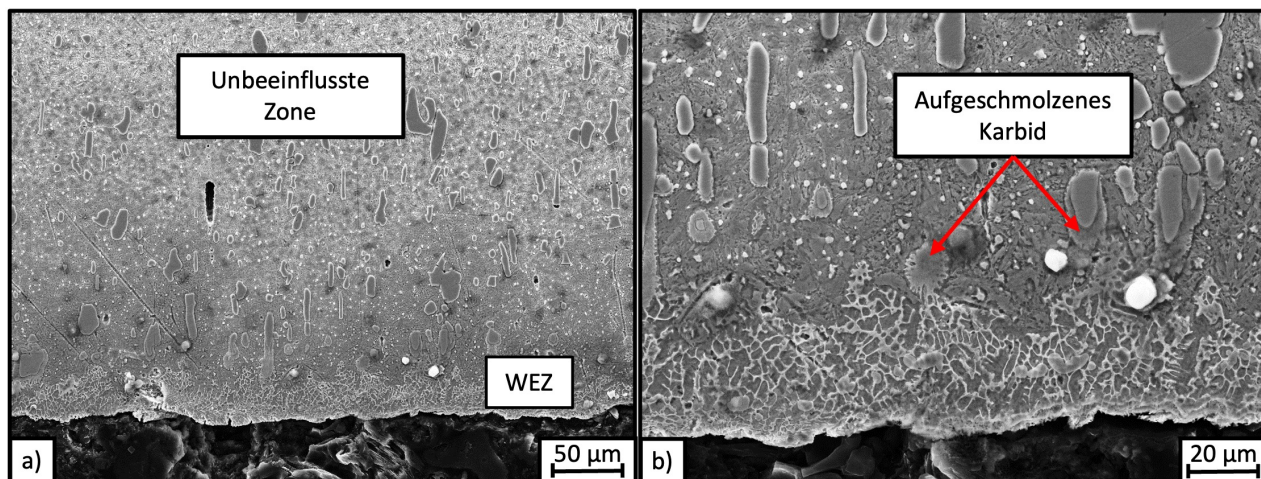


Abbildung 45: Die Abbildung zeigt die Randzone einer Laserstrahl geschnittenen Probe bei a) 1000-facher und b) 3000-facher Vergrößerung (REM). Am Rand ist der aufgeschmolzene und wieder erstarrte Bereich zu sehen. Deutlich erkennbar sind einzelne Metallzellen die von einem Karbidnetzwerk umgeben sind. Angrenzend an diesen Bereich sind Karbide zu sehen, die in Richtung des Randes begonnen haben sich aufzulösen.

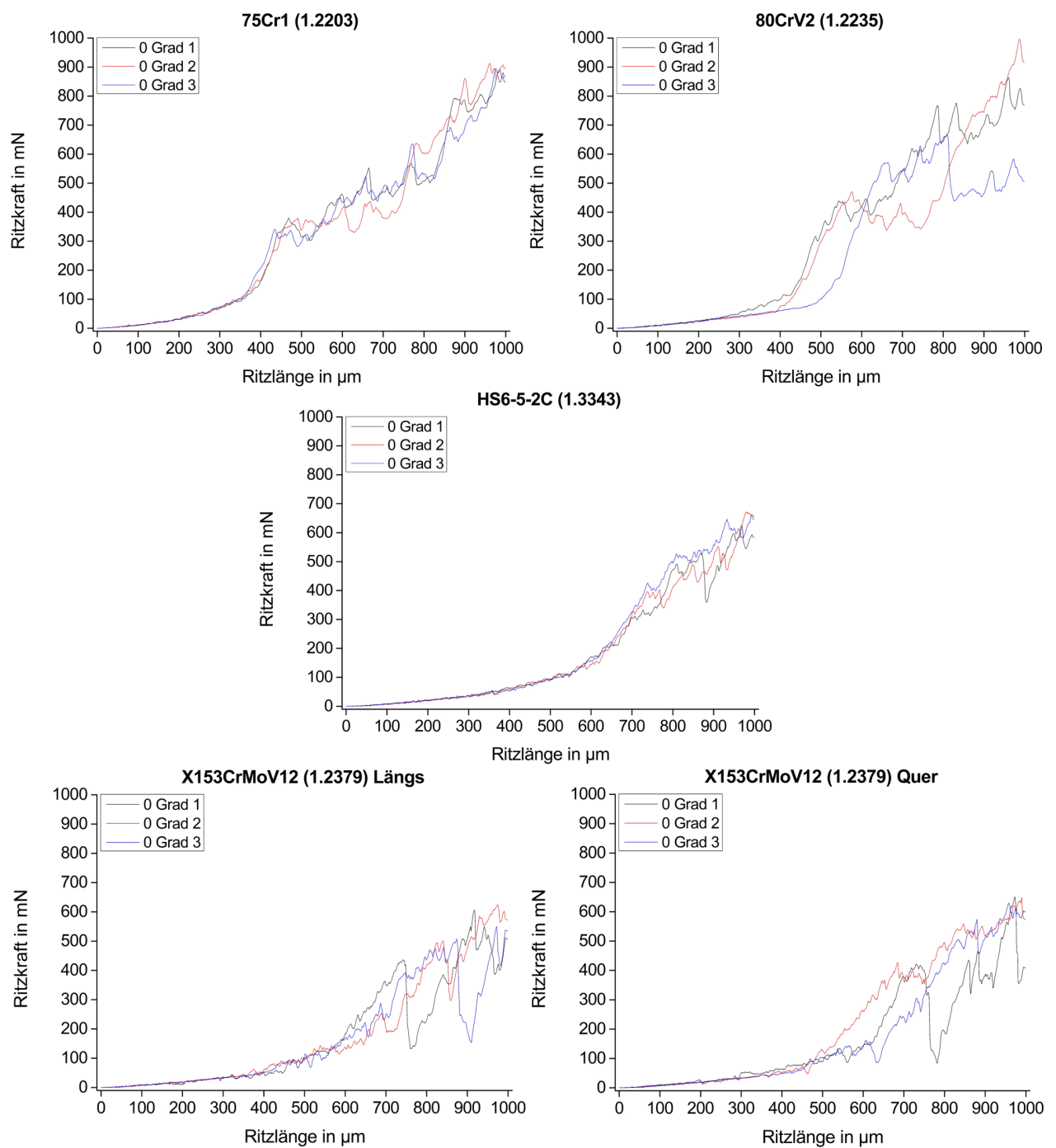


Abbildung 46: Dargestellt sind die aufgezeichneten Querkräfte F_t der Einzelritzversuche in der 0° Ausrichtung. Zu sehen sind die einzelnen Messkurven der pro Werkstoff durchgeführten Einzelritze.

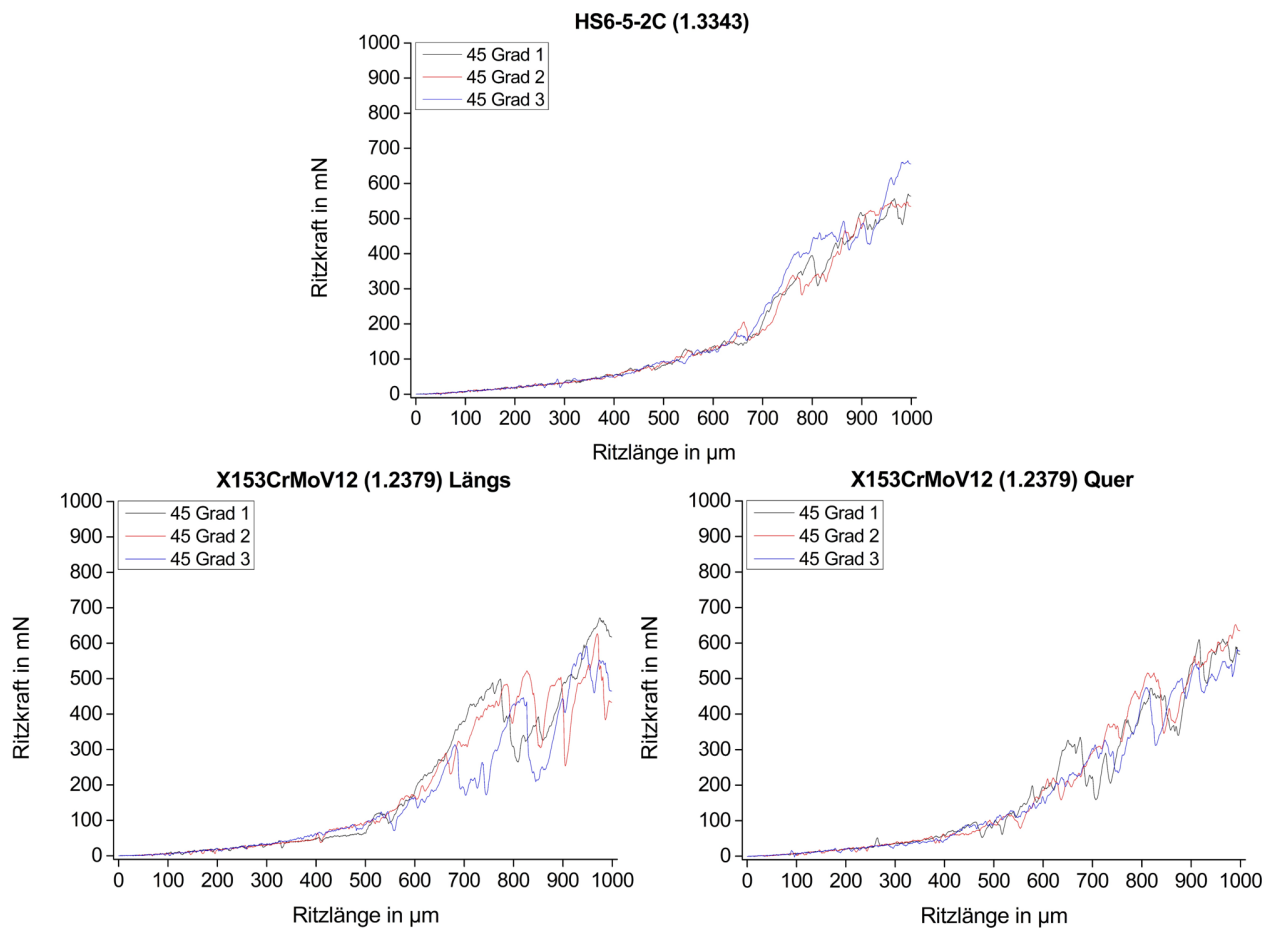


Abbildung 47: Dargestellt sind die aufgezeichneten Querkräfte F_t der Einzelritzversuche in der 45° Ausrichtung. Zu sehen sind die einzelnen Messkurven der pro Werkstoff durchgeführten Einzelritze.

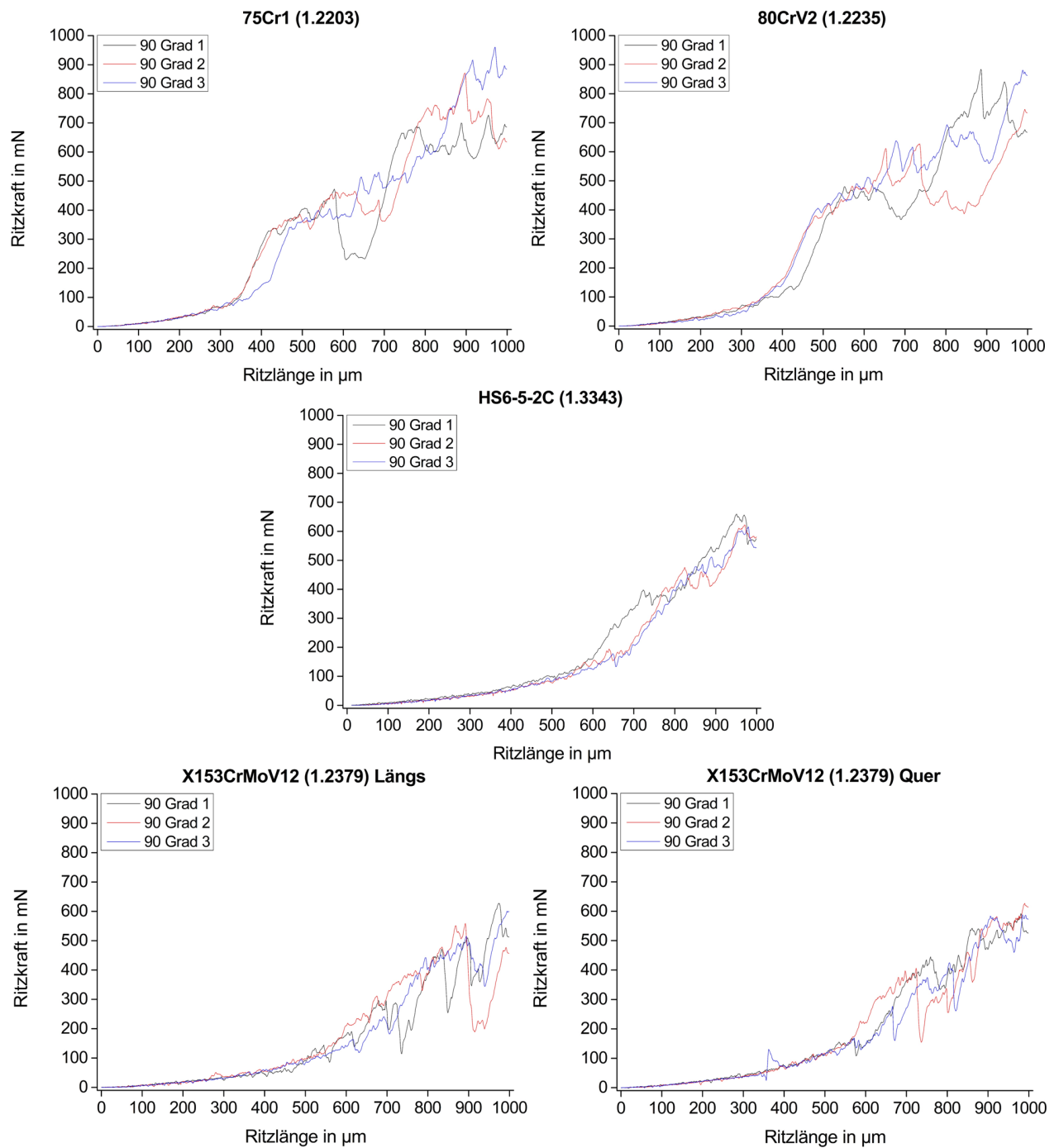


Abbildung 48: Dargestellt sind die aufgezeichneten Querkräfte F_t der Einzelritzversuche in der 90° Ausrichtung. Zu sehen sind die einzelnen Messkurven der pro Werkstoff durchgeführten Einzelritze.

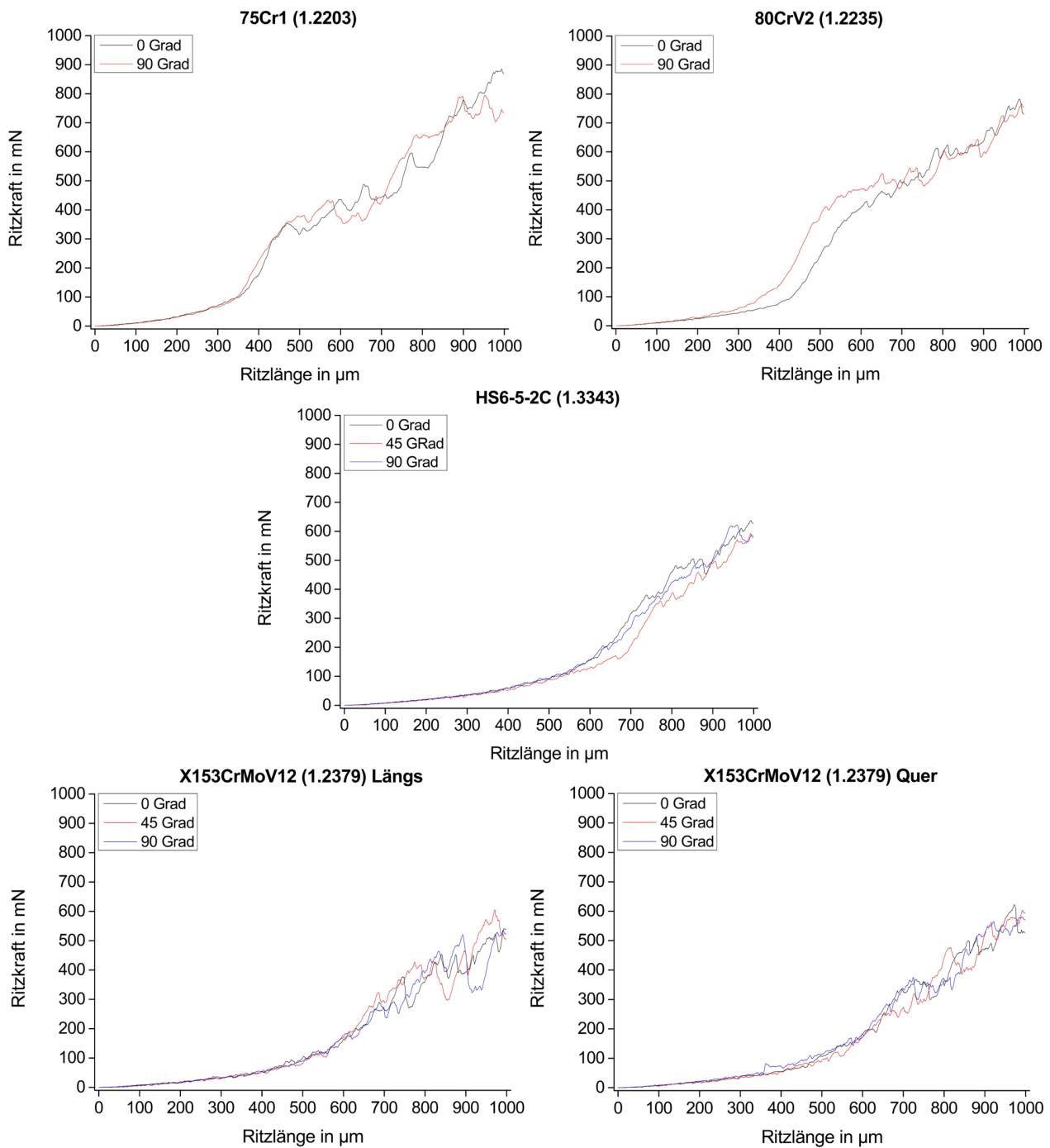


Abbildung 49: Dargestellt sind die gemittelten Querkräfte F_t der Einzelritzversuche in der 0° , 45° und 90° Ausrichtung pro Werkstoff.

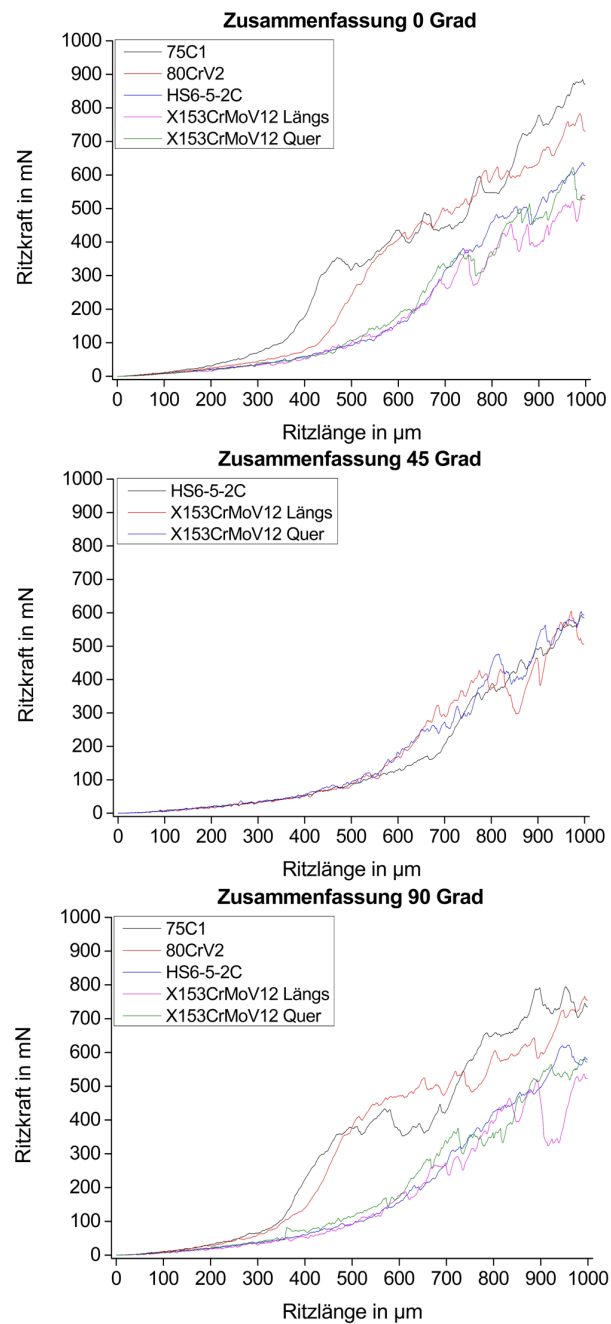


Abbildung 50: Dargestellt sind die gemittelten Querkräfte F_t der Einzelritzversuche in der 0° , 45° und 90° Ausrichtung. Pro Ausrichtung sind die gemittelten Verläufe über die Ritzlänge von $1000\ \mu\text{m}$ aufgetragen.

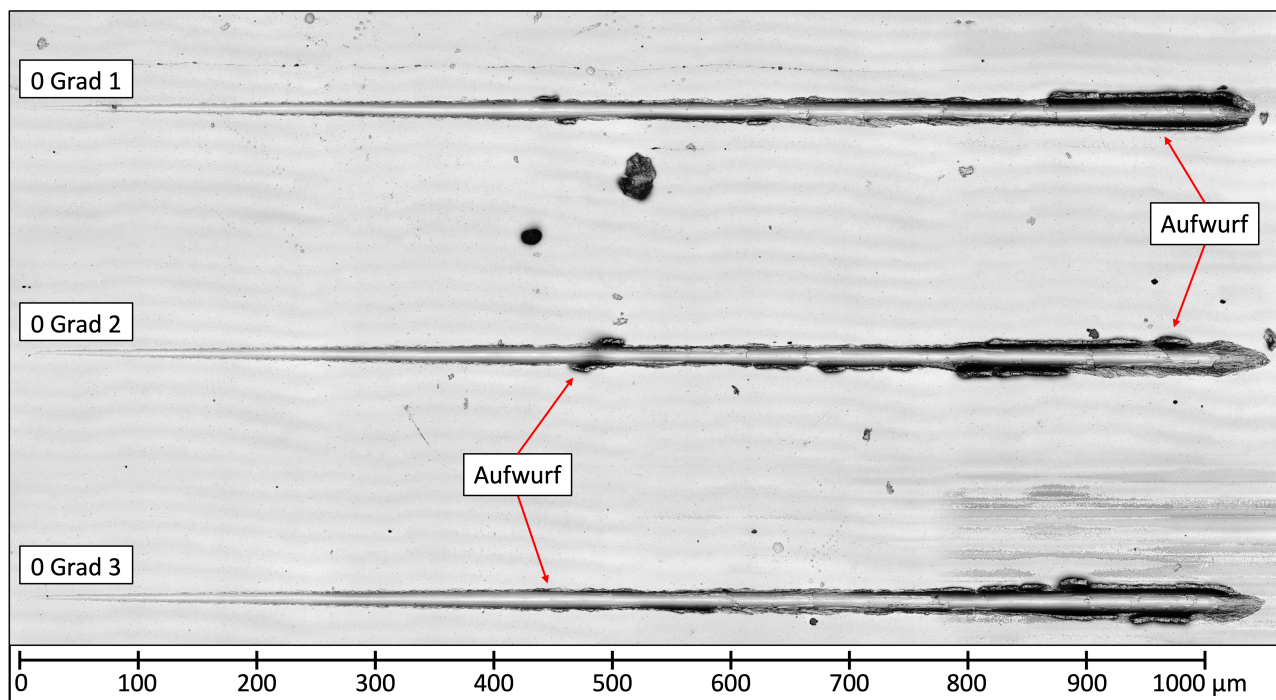


Abbildung 51: Laserscanning-Mikroskopische Aufnahme der durchgeführten Einzelritzspuren des 75Cr1 (1.2003) bei der Ritzrichtung von 0° .

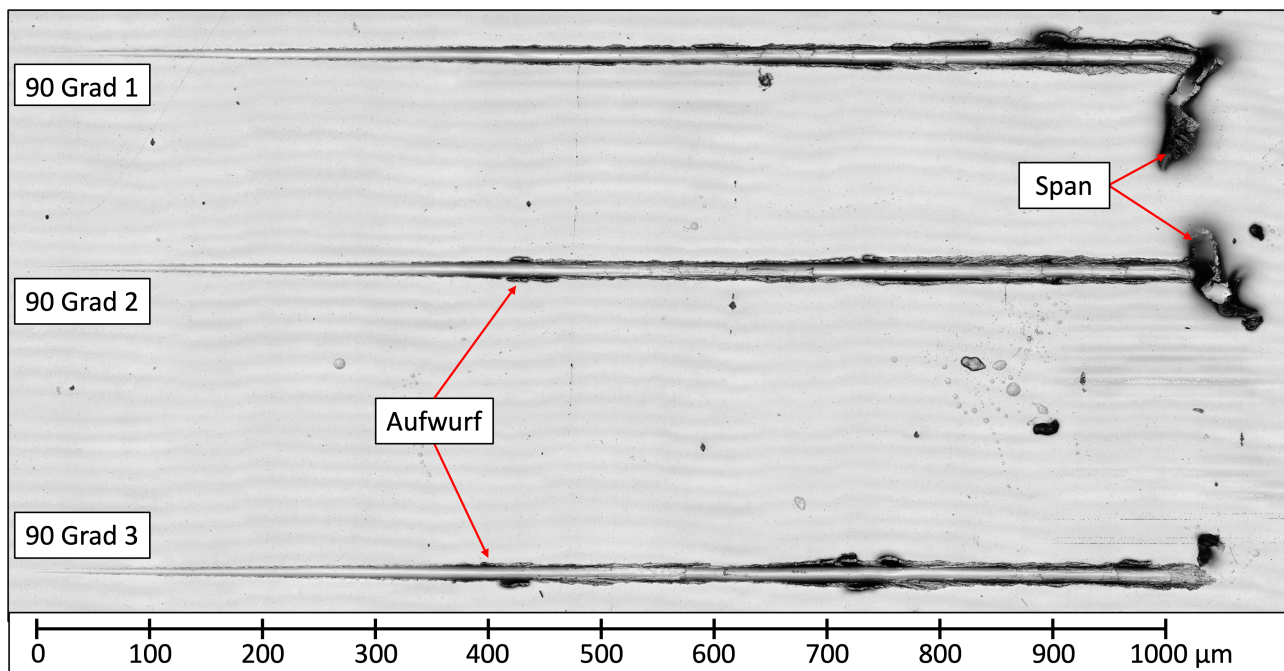


Abbildung 52: Laserscanning-Mikroskopische Aufnahme der durchgeführten Einzelritzspuren des 75Cr1 (1.2003) bei der Ritzrichtung von 90° .

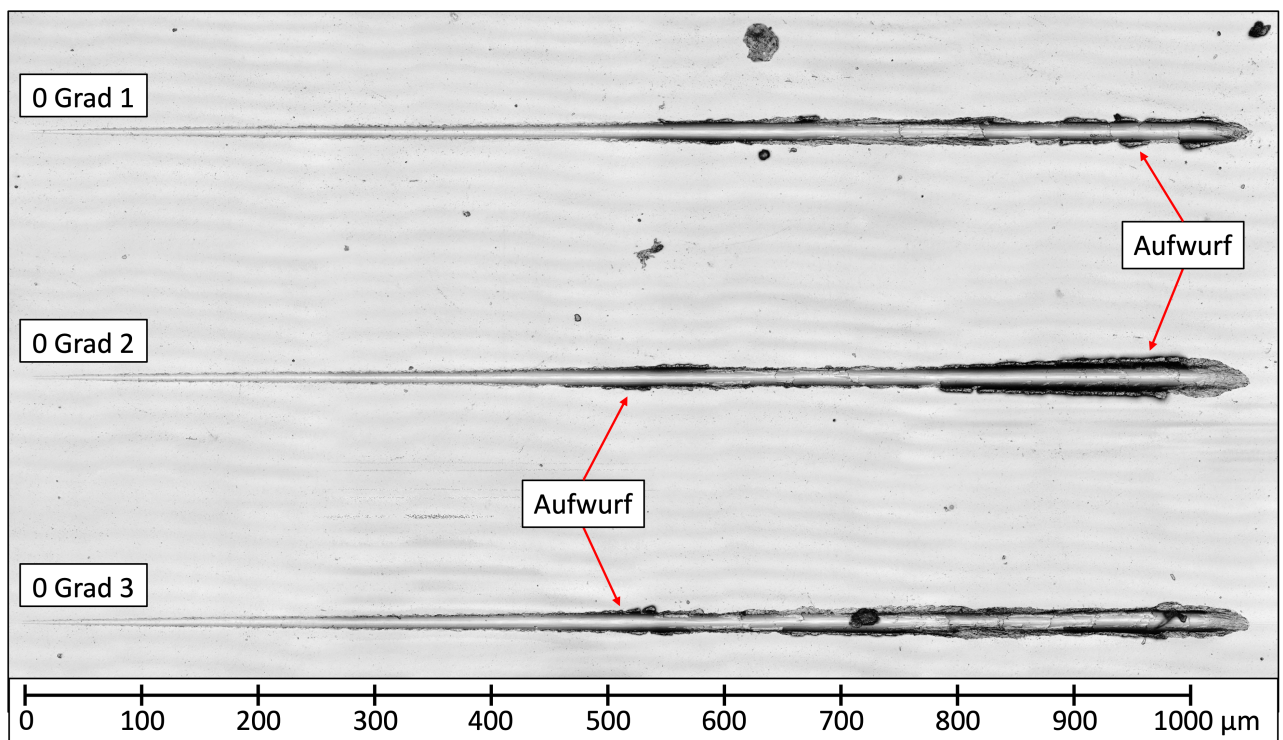


Abbildung 53: Laserscanning-Mikroskopische Aufnahme der durchgeführten Einzelritzspuren des 80CrV2 (1.2235) bei der Ritzrichtung von 0° .

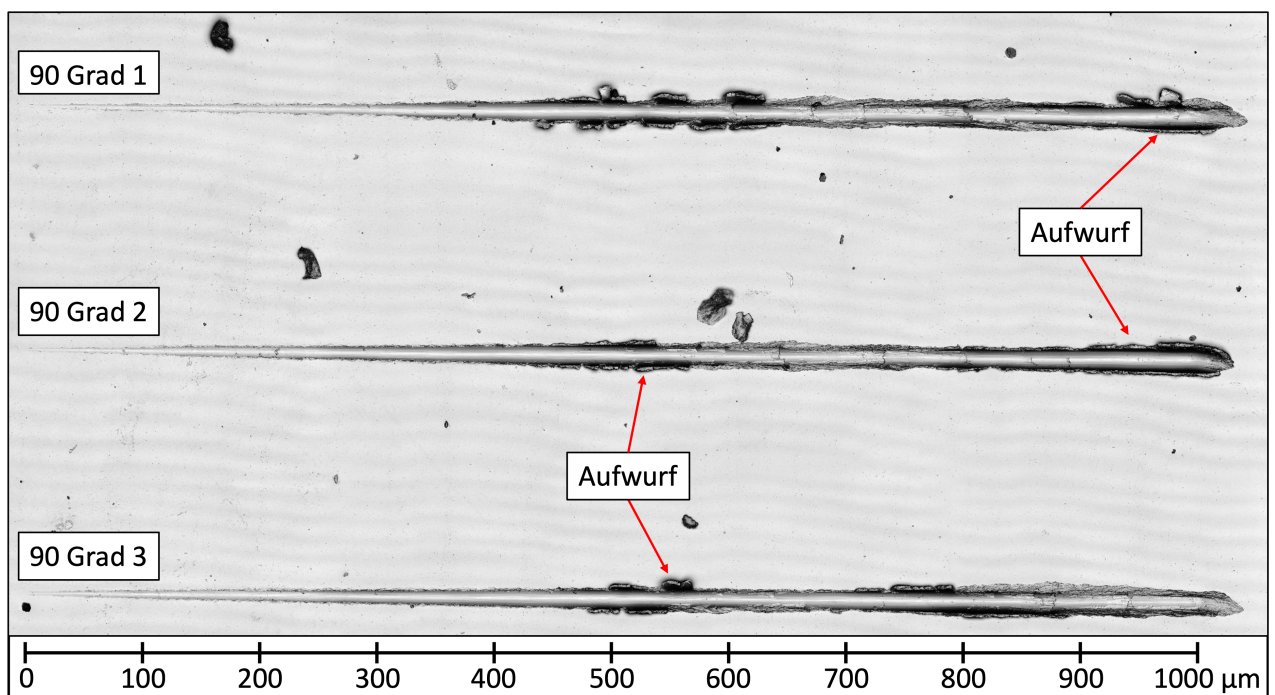


Abbildung 54: Laserscanning-Mikroskopische Aufnahme der durchgeführten Einzelritzspuren des 80CrV2 (1.2235) bei der Ritzrichtung von 90° .

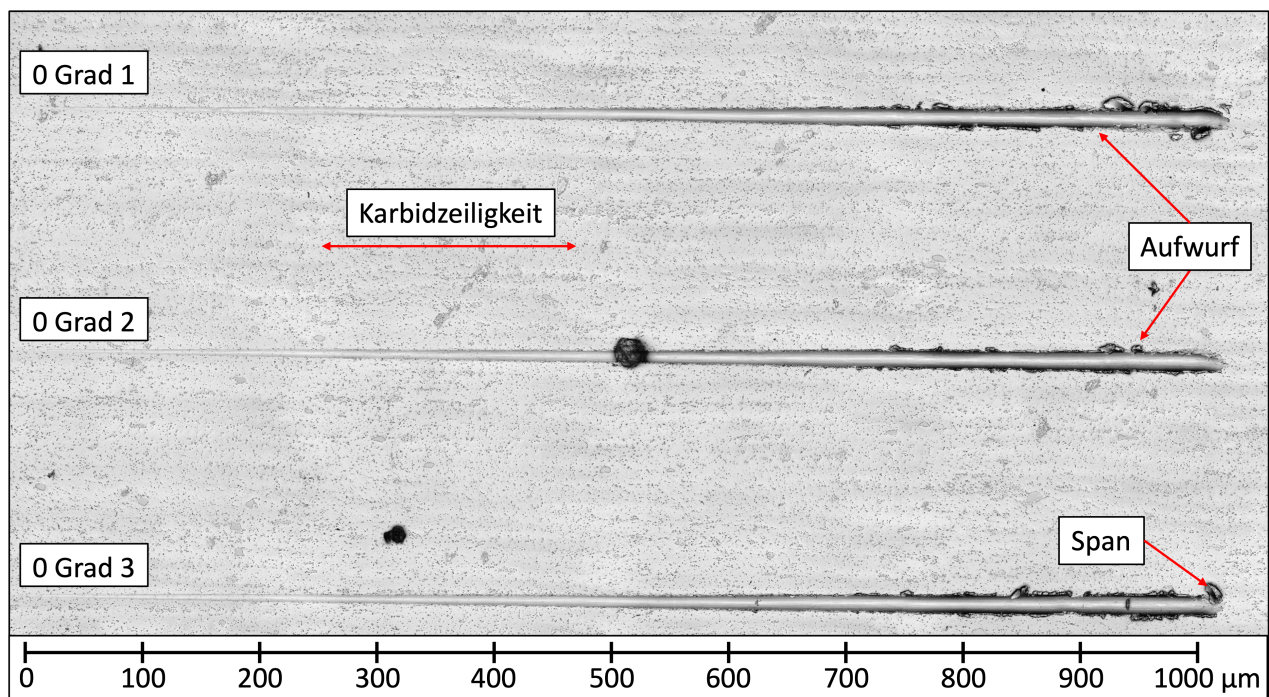


Abbildung 55: Laserscanning-Mikroskopische Aufnahme der durchgeführten Einzelritzspuren des HS6-5-2C (1.3342) bei der Ritzrichtung von 0° .

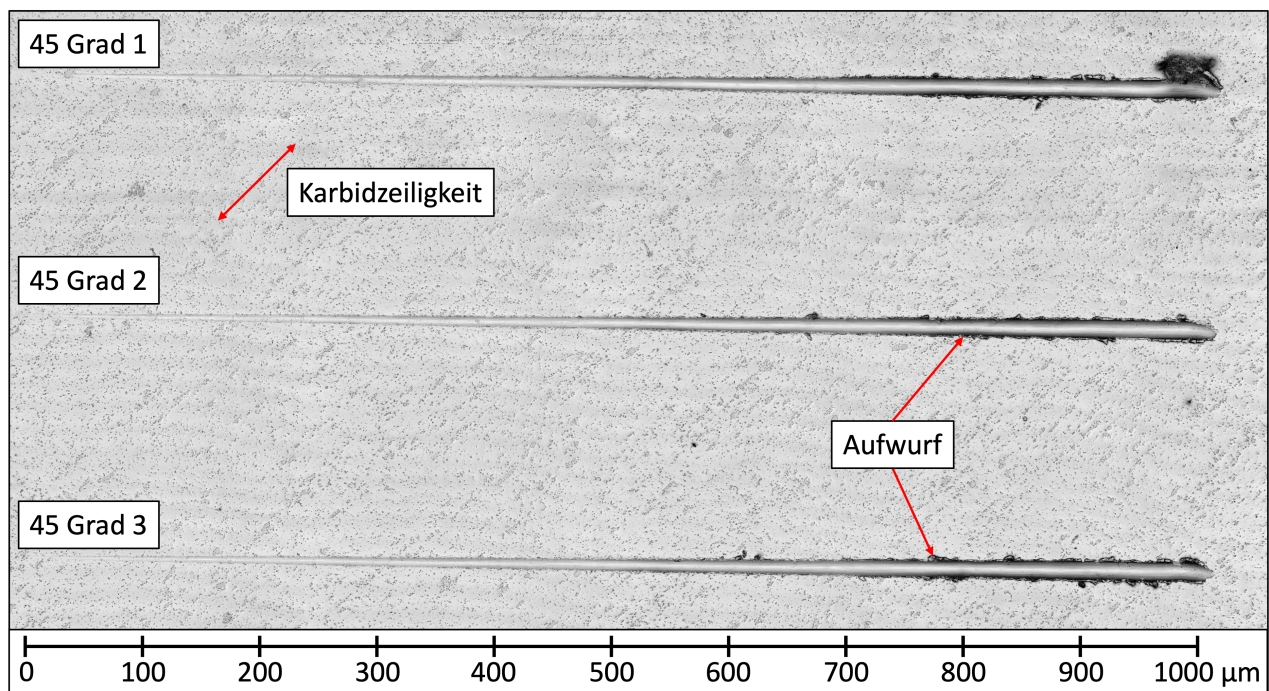


Abbildung 56: Laserscanning-Mikroskopische Aufnahme der durchgeführten Einzelritzspuren des HS6-5-2C (1.3342) bei der Ritzrichtung von 45° .

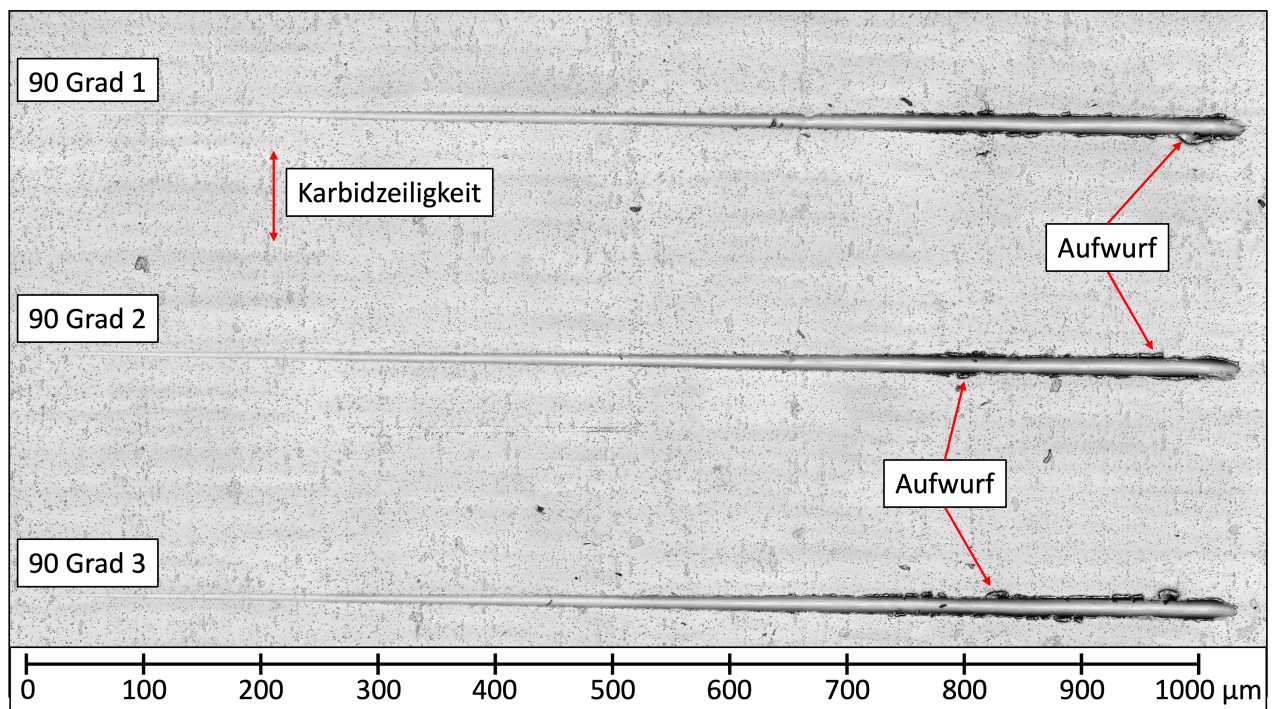


Abbildung 57: Laserscanning-Mikroskopische Aufnahme der durchgeführten Einzelritzspuren des HS6-5-2C (1.3342) bei der Ritzrichtung von 90°.

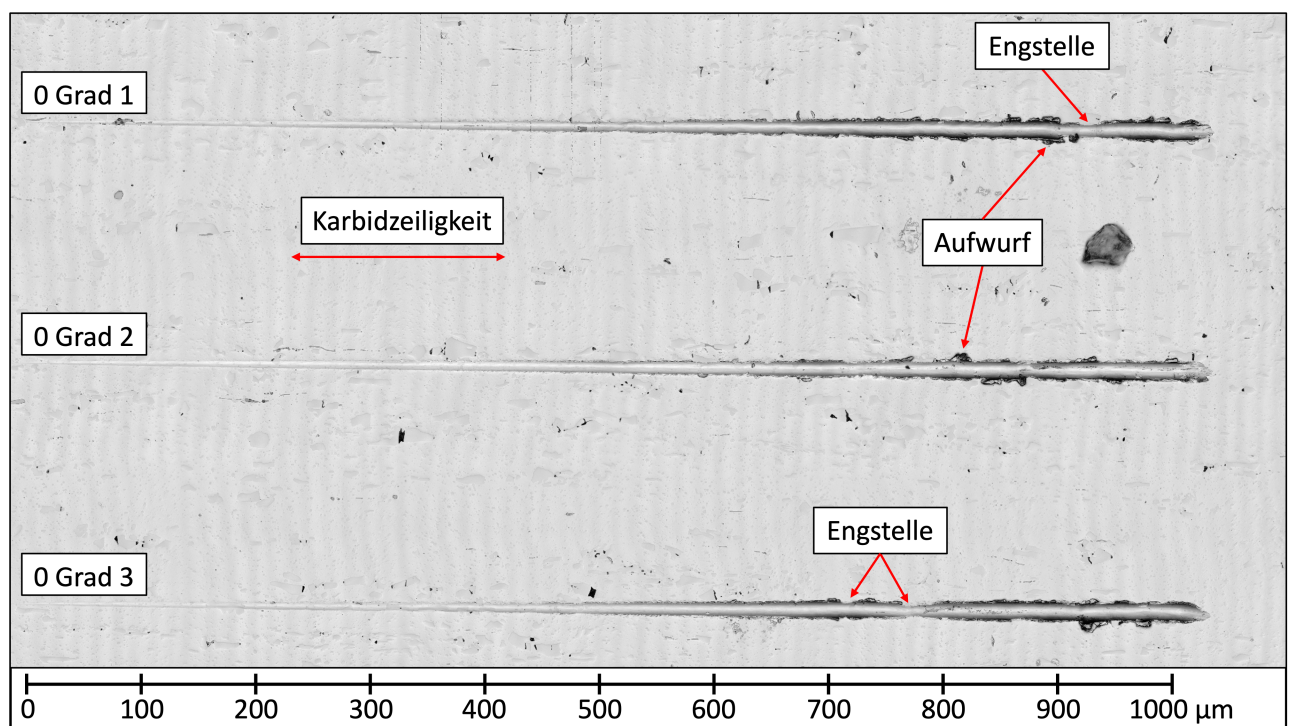


Abbildung 58: Laserscanning-Mikroskopische Aufnahme der durchgeführten Einzelritzspuren des X153CrMoV12 (1.2379) entlang der Karbidausrichtung bei der Ritzrichtung von 0°.

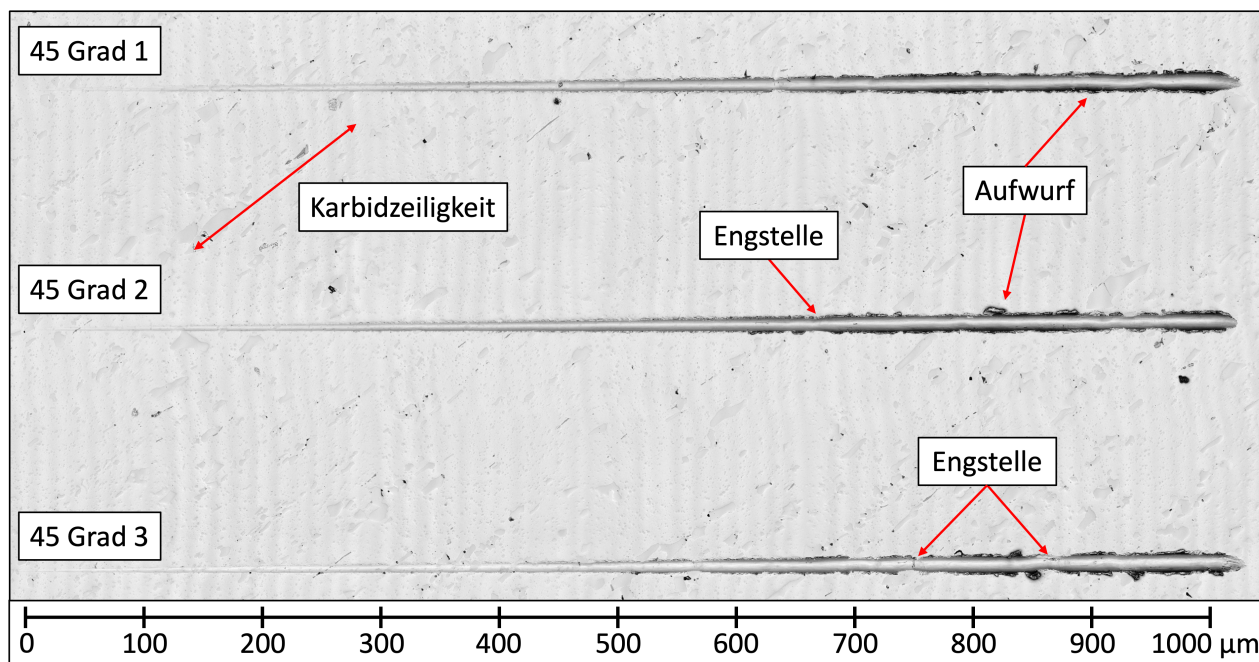


Abbildung 59: Laserscanning-Mikroskopische Aufnahme der durchgeführten Einzelritzspuren des X153CrMoV12 (1.2379) entlang der Karbidausrichtung bei der Ritzrichtung von 45° .

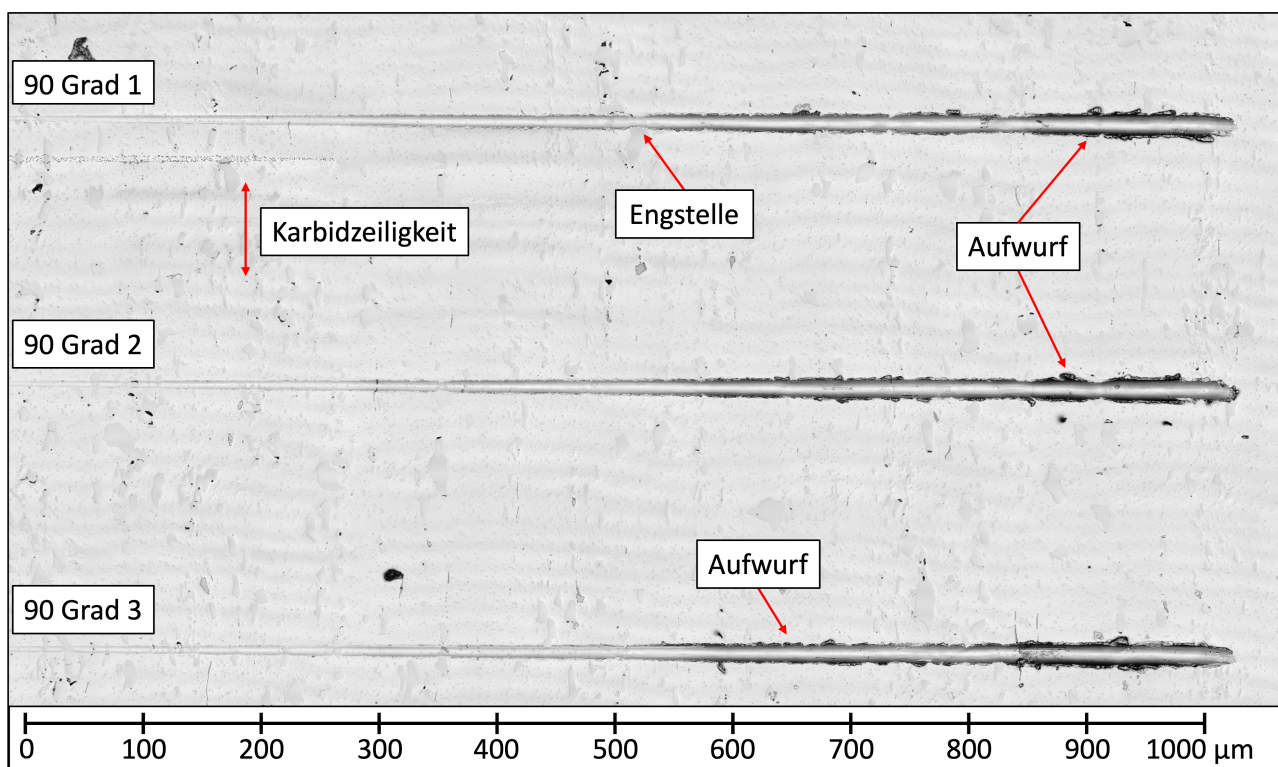


Abbildung 60: Laserscanning-Mikroskopische Aufnahme der durchgeführten Einzelritzspuren des X153CrMoV12 (1.2379) entlang der Karbidausrichtung bei der Ritzrichtung von 90° .

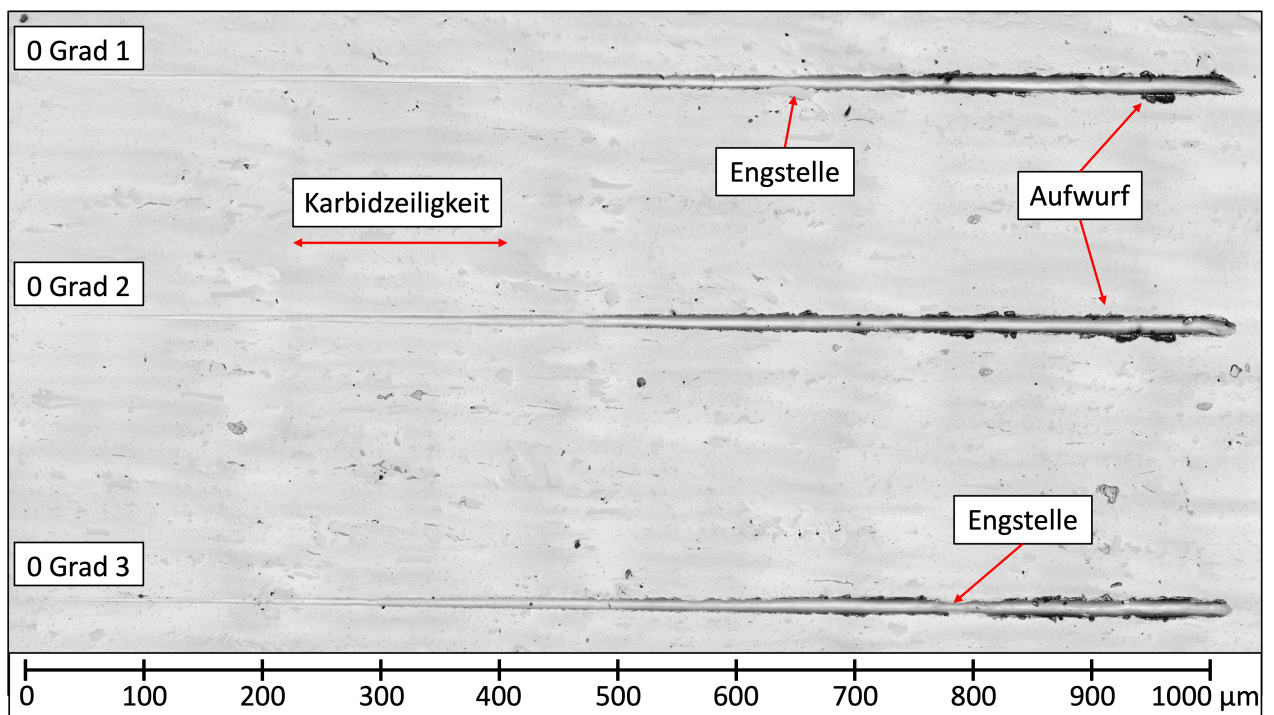


Abbildung 61: Laserscanning-Mikroskopische Aufnahme der durchgeführten Einzelritzspuren des X153CrMoV12 (1.2379) senkrecht zu der Karbidausrichtung bei der Ritzrichtung von 0°.

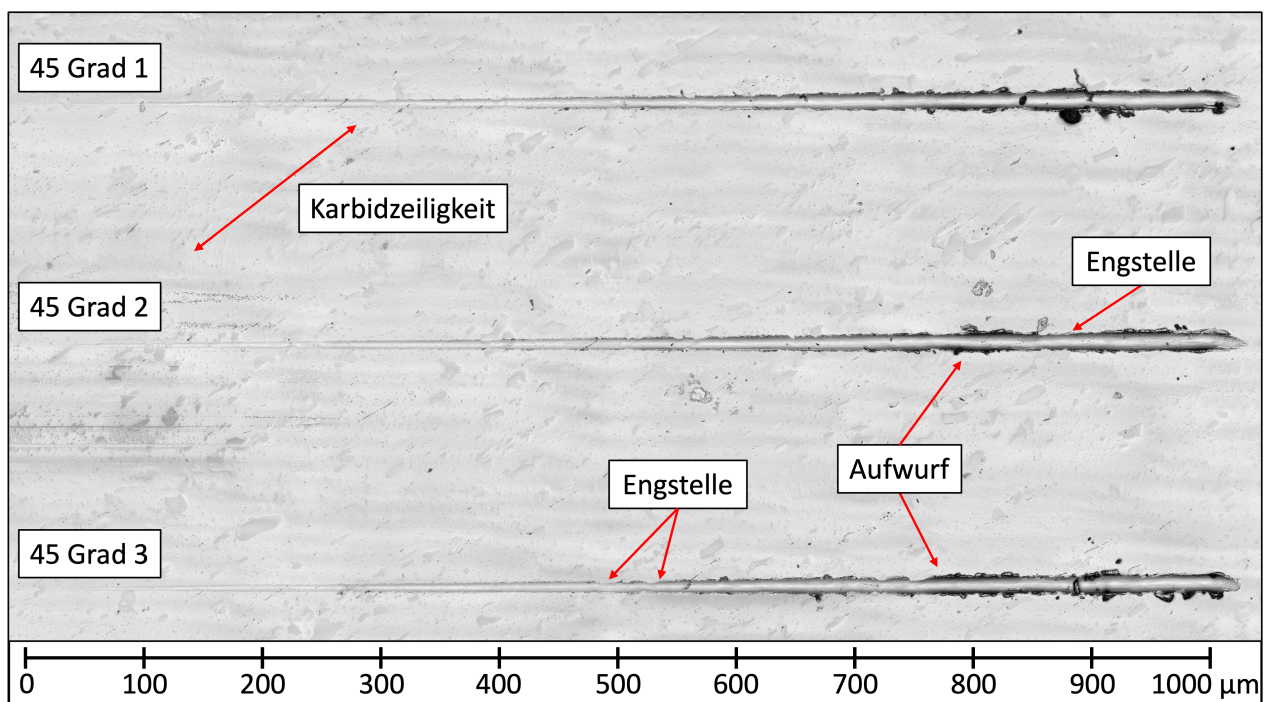


Abbildung 62: Laserscanning-Mikroskopische Aufnahme der durchgeführten Einzelritzspuren des X153CrMoV12 (1.2379) senkrecht zu der Karbidausrichtung bei der Ritzrichtung von 45°.

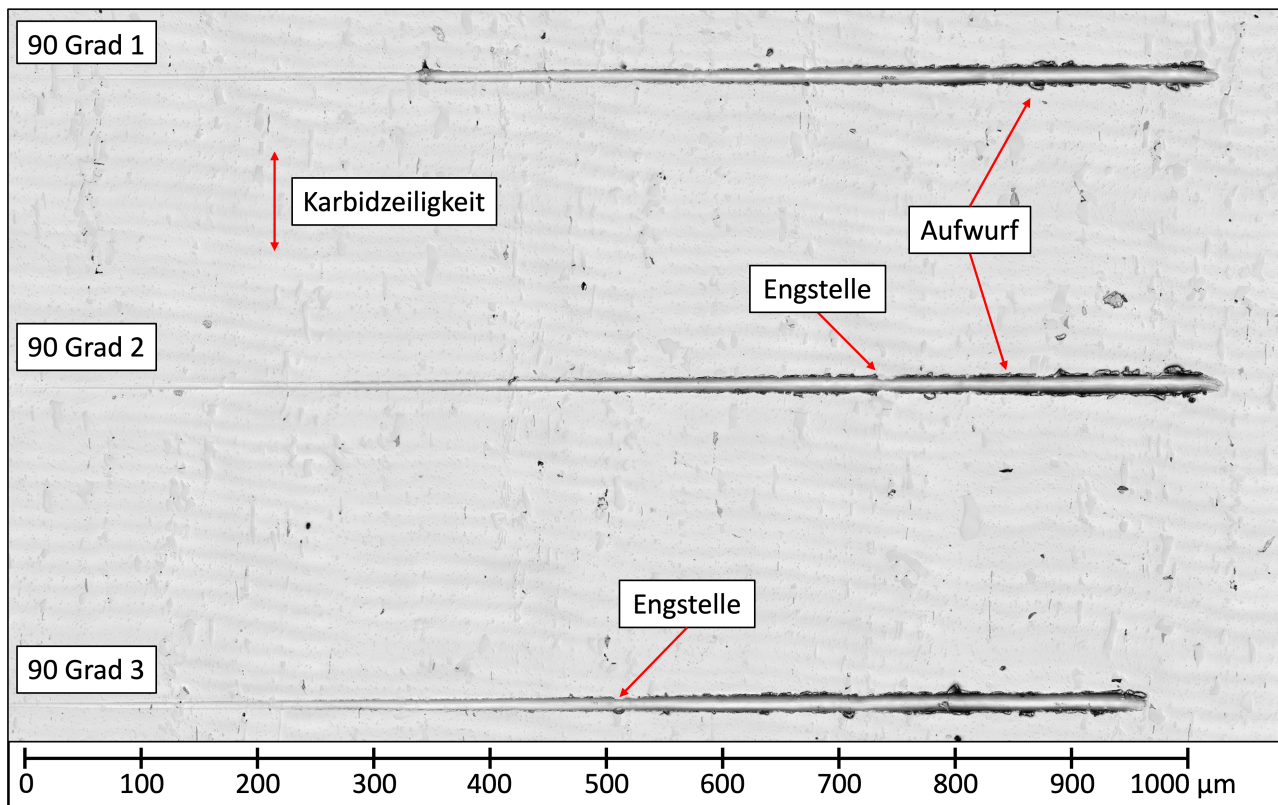


Abbildung 63: Laserscanning-Mikroskopische Aufnahme der durchgeführten Einzelritzspuren des X153CrMoV12 (1.2379) senkrecht zu der Karbidausrichtung bei der Ritzrichtung von 90°.

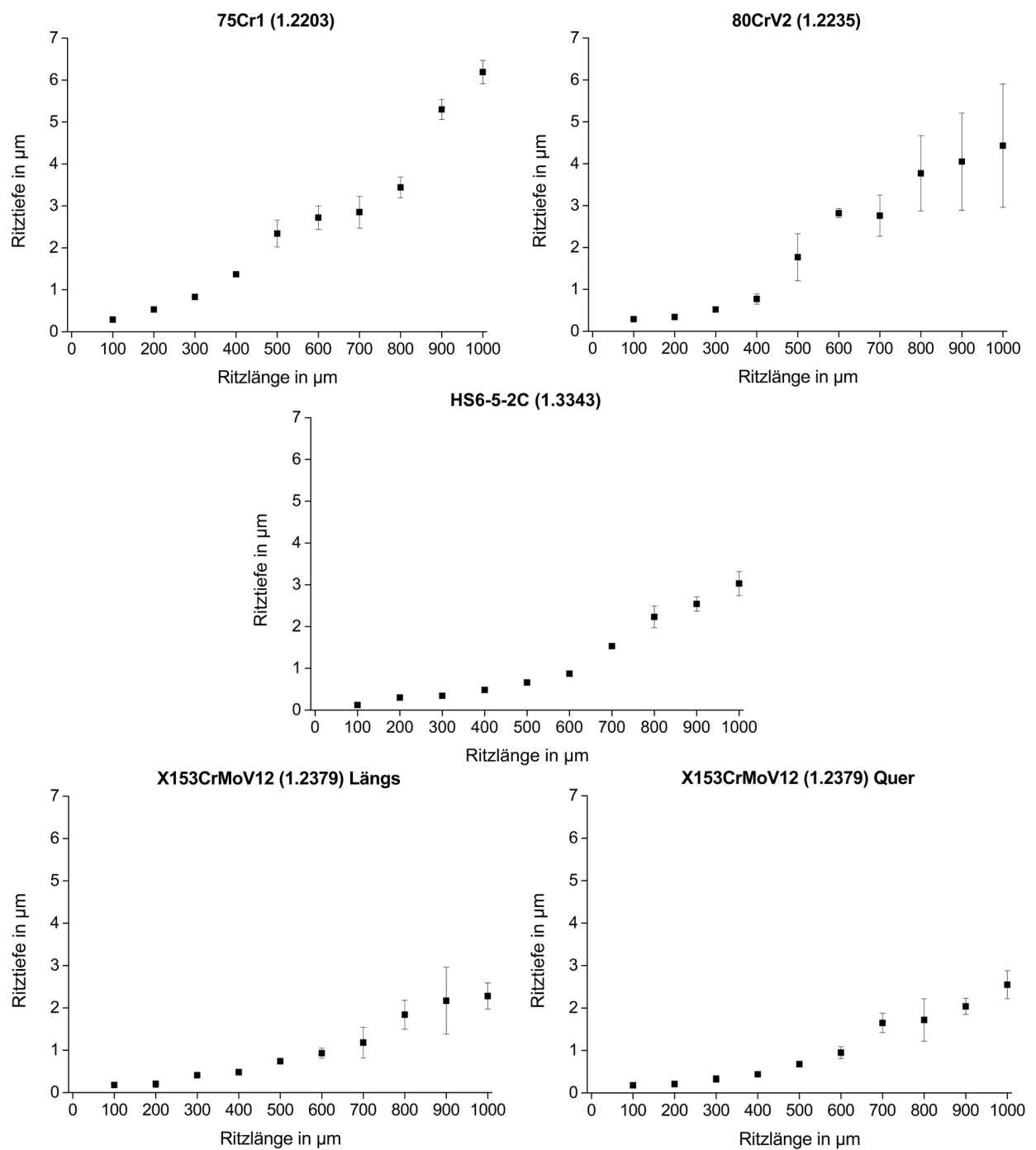


Abbildung 64: Zusammenfassungen der ermittelten Ritztiefen von den verwendeten Werkstoffen bei einer Ritzausrichtung von 0° .

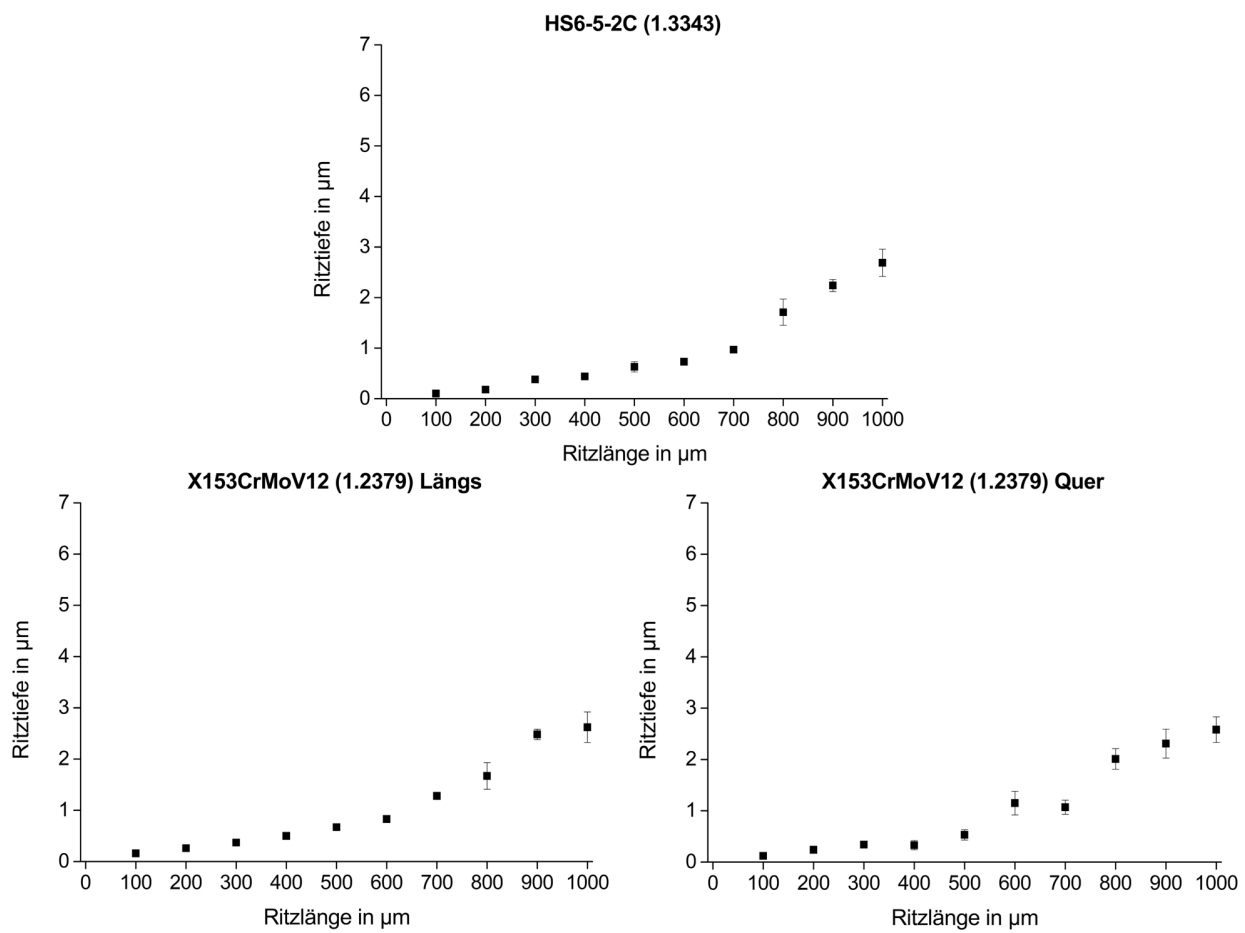


Abbildung 65: Zusammenfassungen der ermittelten Ritztiefen von den verwendeten Werkstoffen bei einer Ritzausrichtung von 45° .

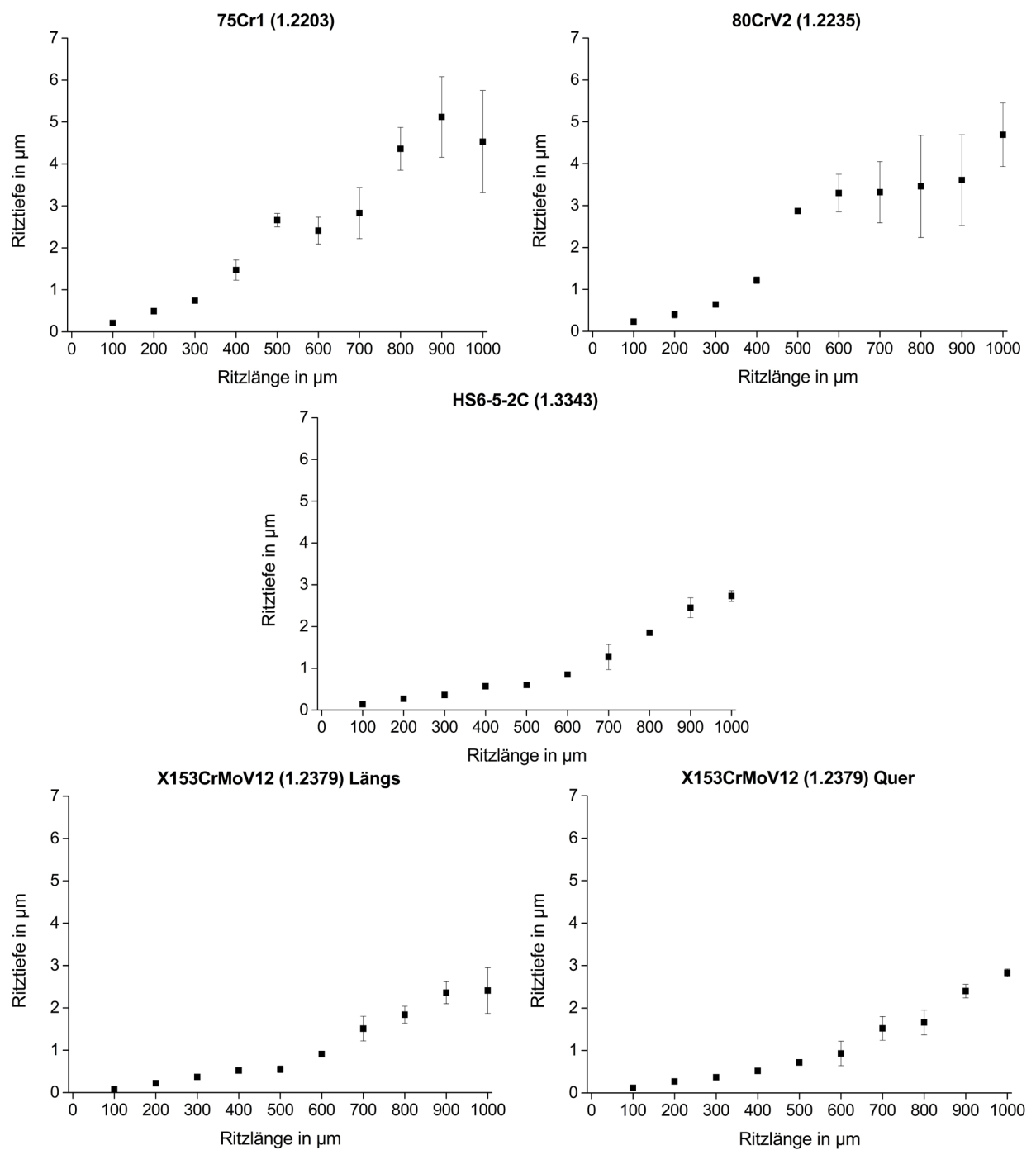


Abbildung 66: Zusammenfassungen der ermittelten Ritztiefen von den verwendeten Werkstoffen bei einer Ritzausrichtung von 90° .

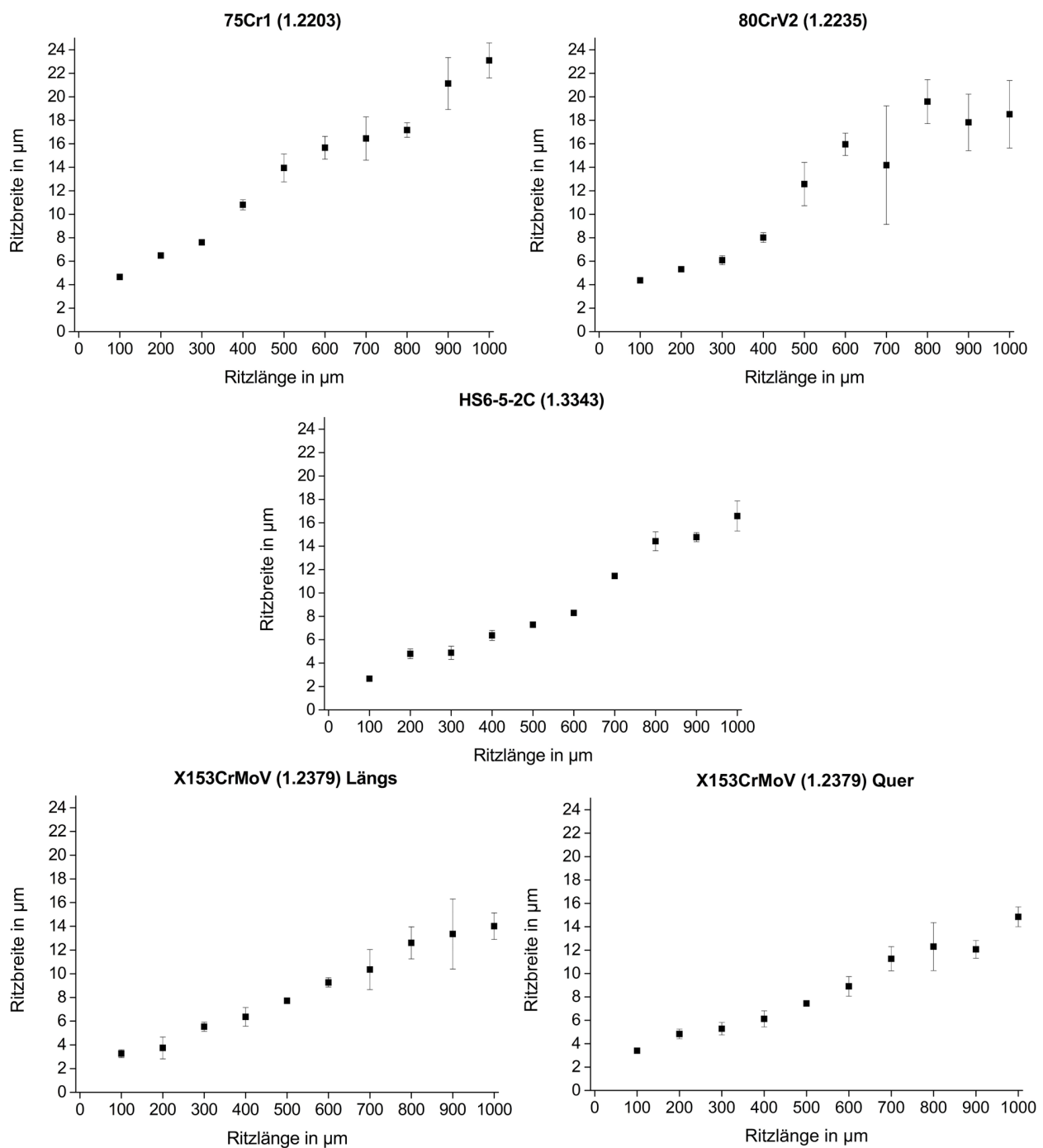


Abbildung 67: Zusammenfassungen der ermittelten Ritzbreiten von den verwendeten Werkstoffen bei einer Ritzausrichtung von 0° .

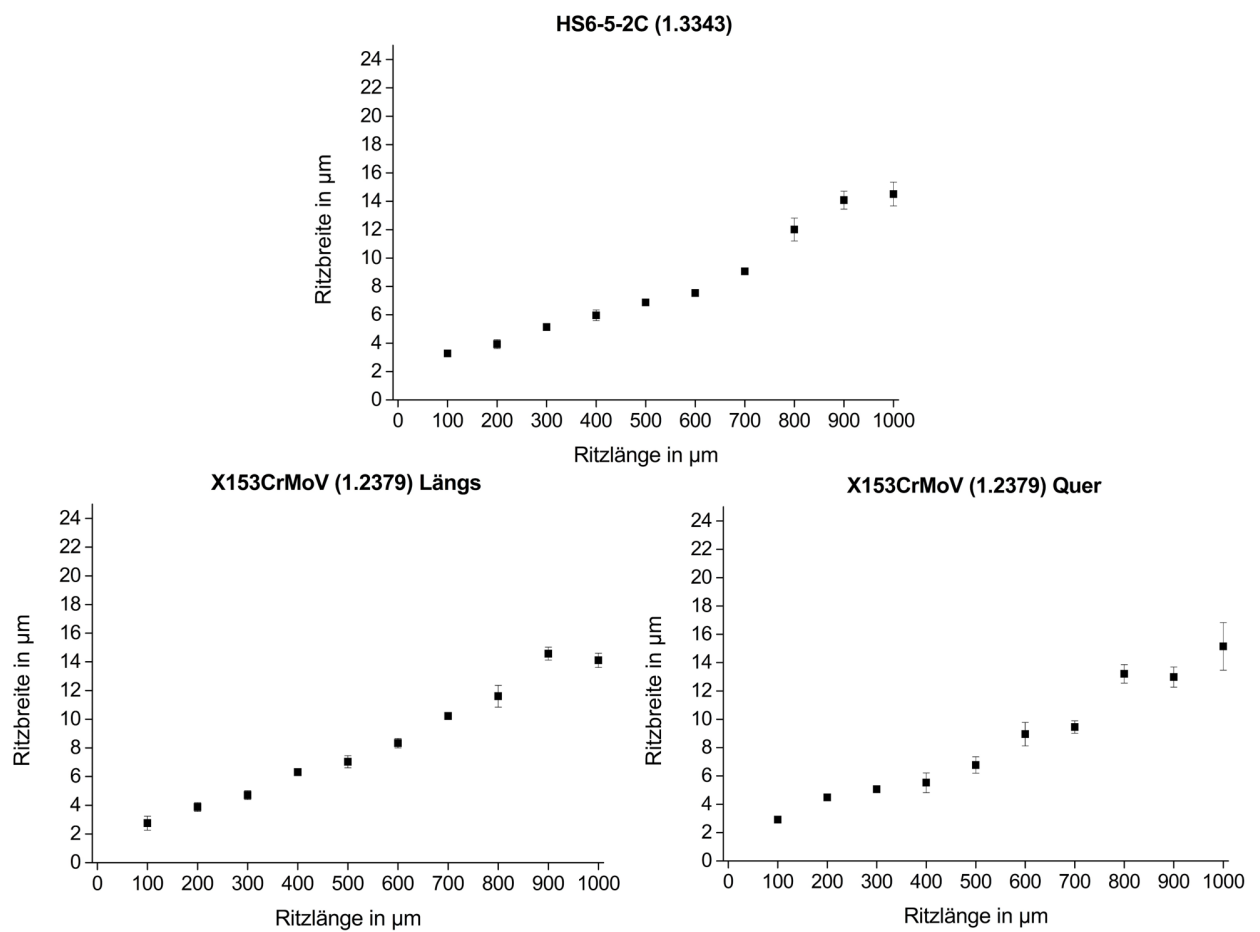


Abbildung 68: Zusammenfassungen der ermittelten Ritzbreiten von den verwendeten Werkstoffen bei einer Ritzausrichtung von 45° .

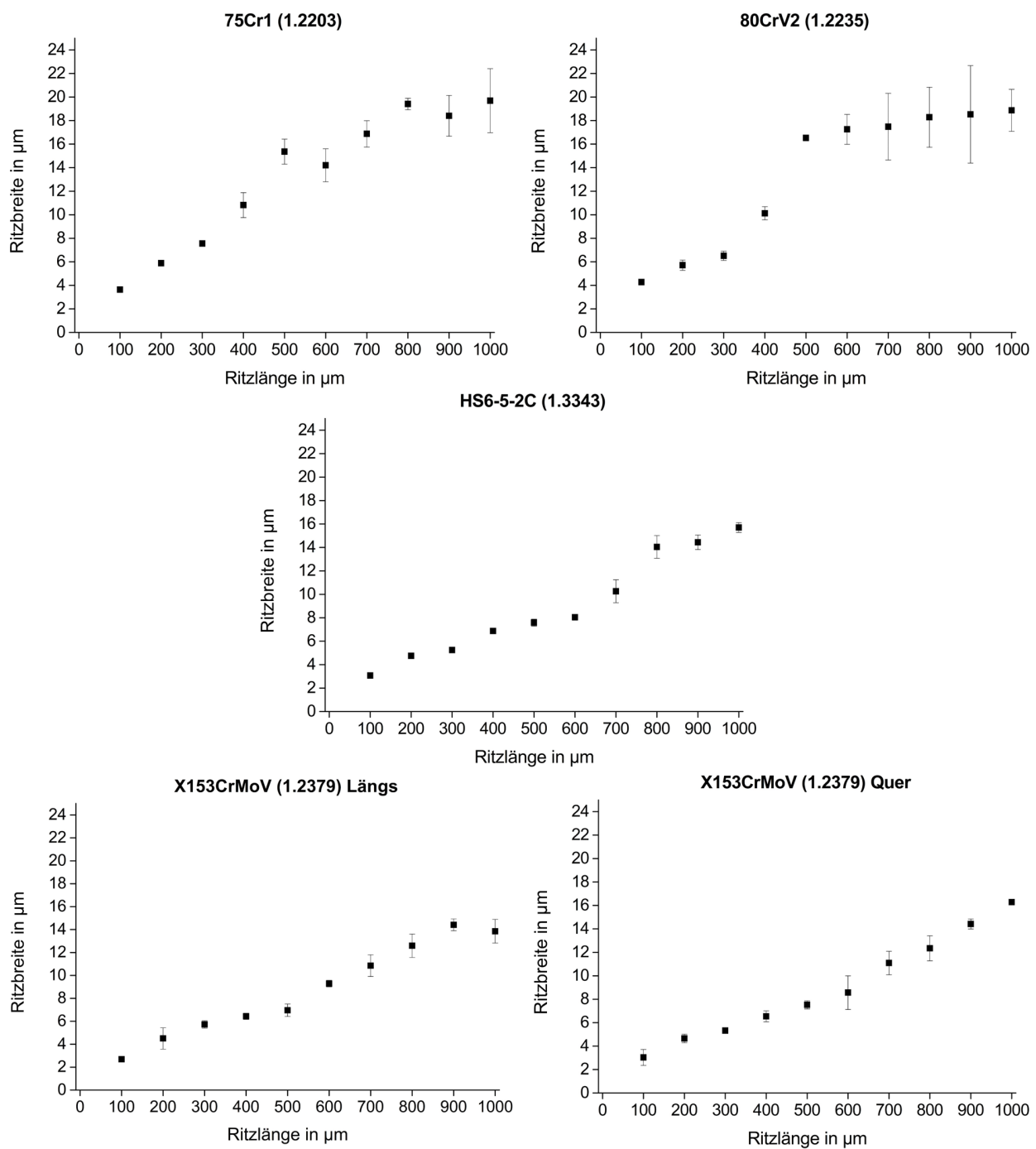


Abbildung 69: Zusammenfassungen der ermittelten Ritzbreiten von den verwendeten Werkstoffen bei einer Ritzausrichtung von 90°.

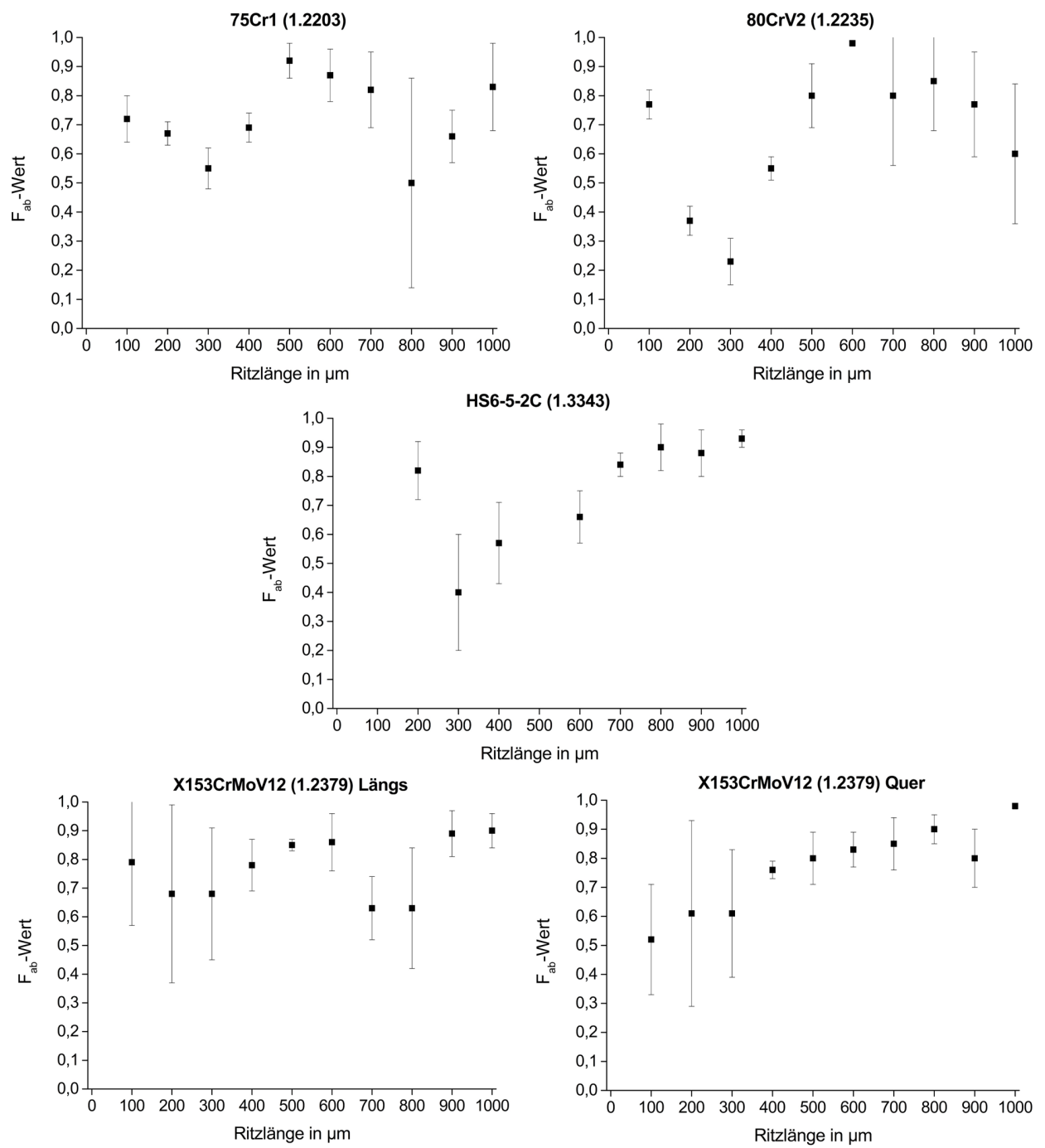


Abbildung 70: Zusammenfassungen von den ermittelten F_{ab} -Werten der verwendeten Werkstoffe bei einer Ritzausrichtung von 0° .

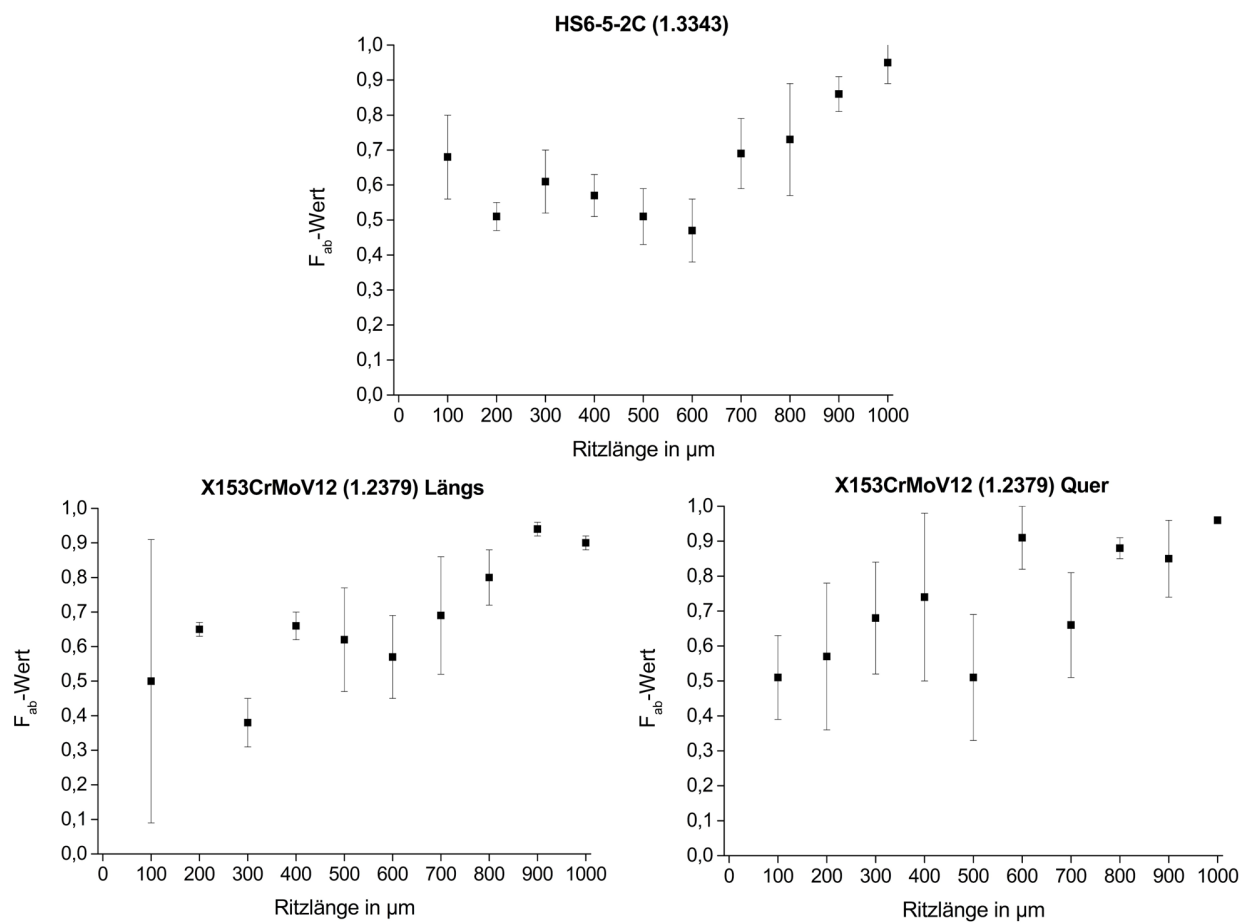


Abbildung 71: Zusammenfassungen von den ermittelten F_{ab} -Werten der verwendeten Werkstoffe bei einer Ritzausrichtung von 45° .

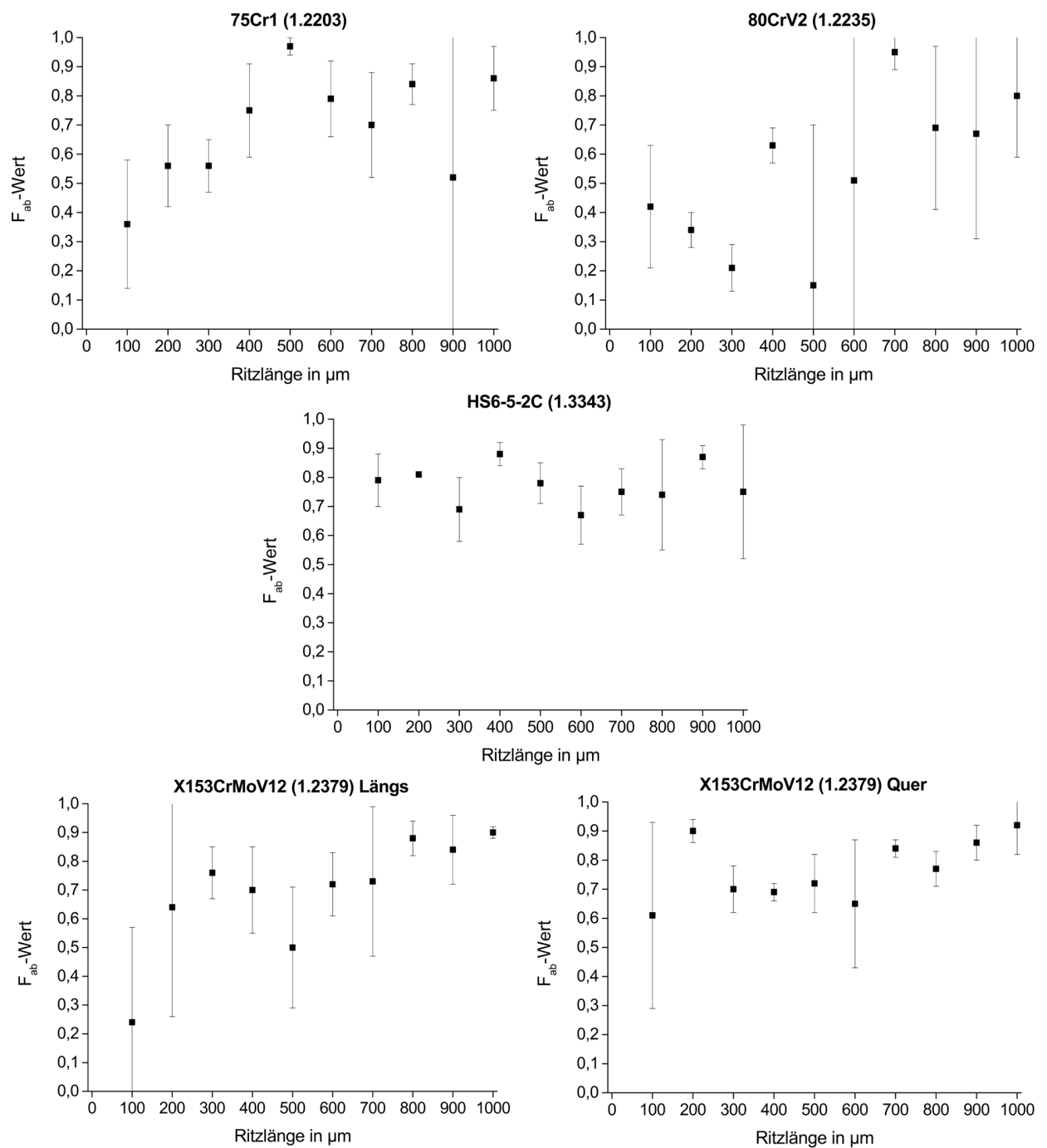


Abbildung 72: Zusammenfassungen von den ermittelten F_{ab} -Werten der verwendeten Werkstoffe bei einer Ritzausrichtung von 90° .

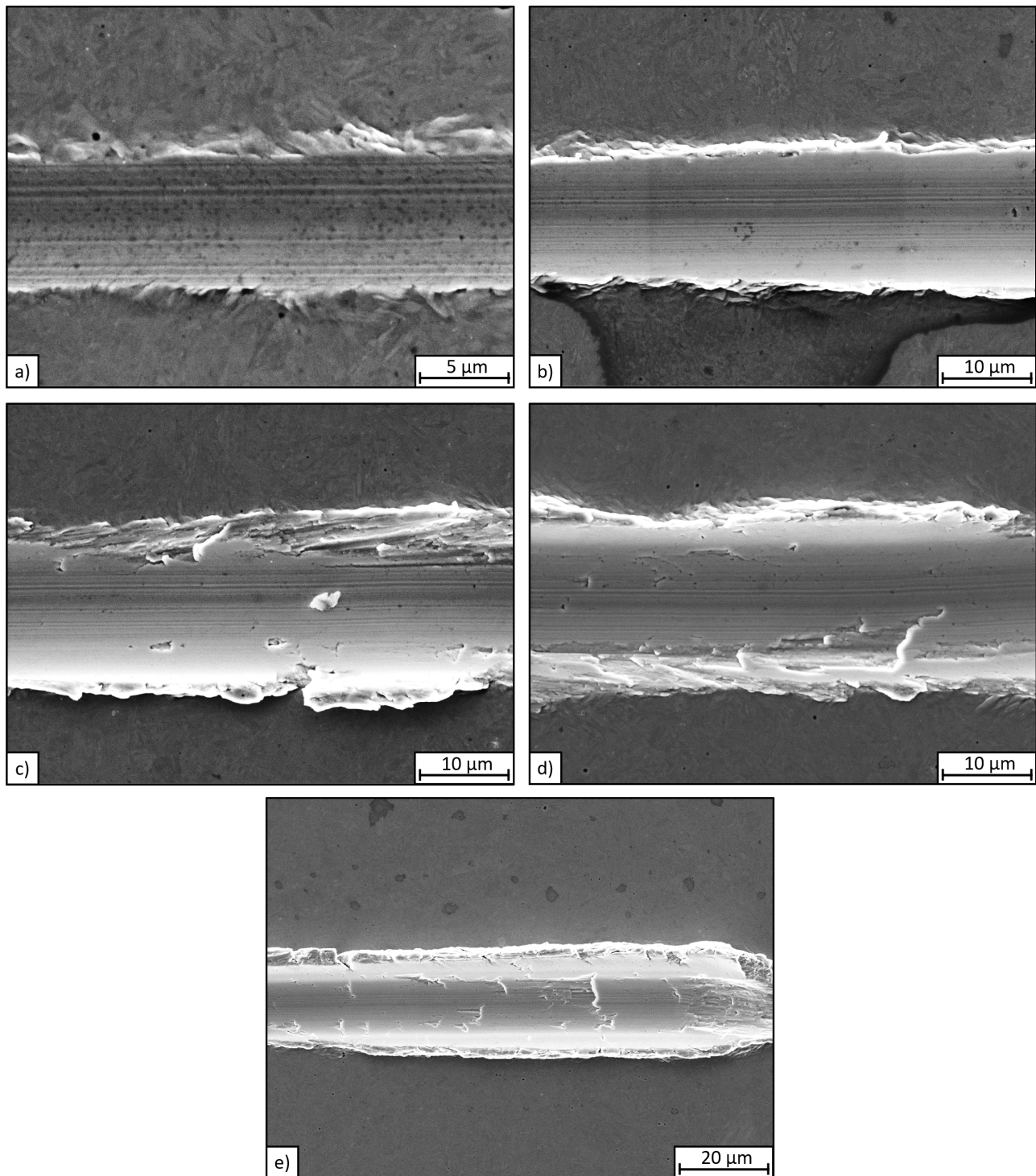


Abbildung 73: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen einer Einzelritzspur des 75Cr1 (1.2003) in der 90°-Ausrichtung. Die Aufnahmen zeigen die Ritzpositionen bei a) 10 000-facher Vergrößerung nach 200 μm, b) bei 5000-facher Vergrößerung nach 400 μm, c) 600 μm, d) 800 μm und bei 2000-facher Vergrößerung nach 1000 μm Ritzlänge.

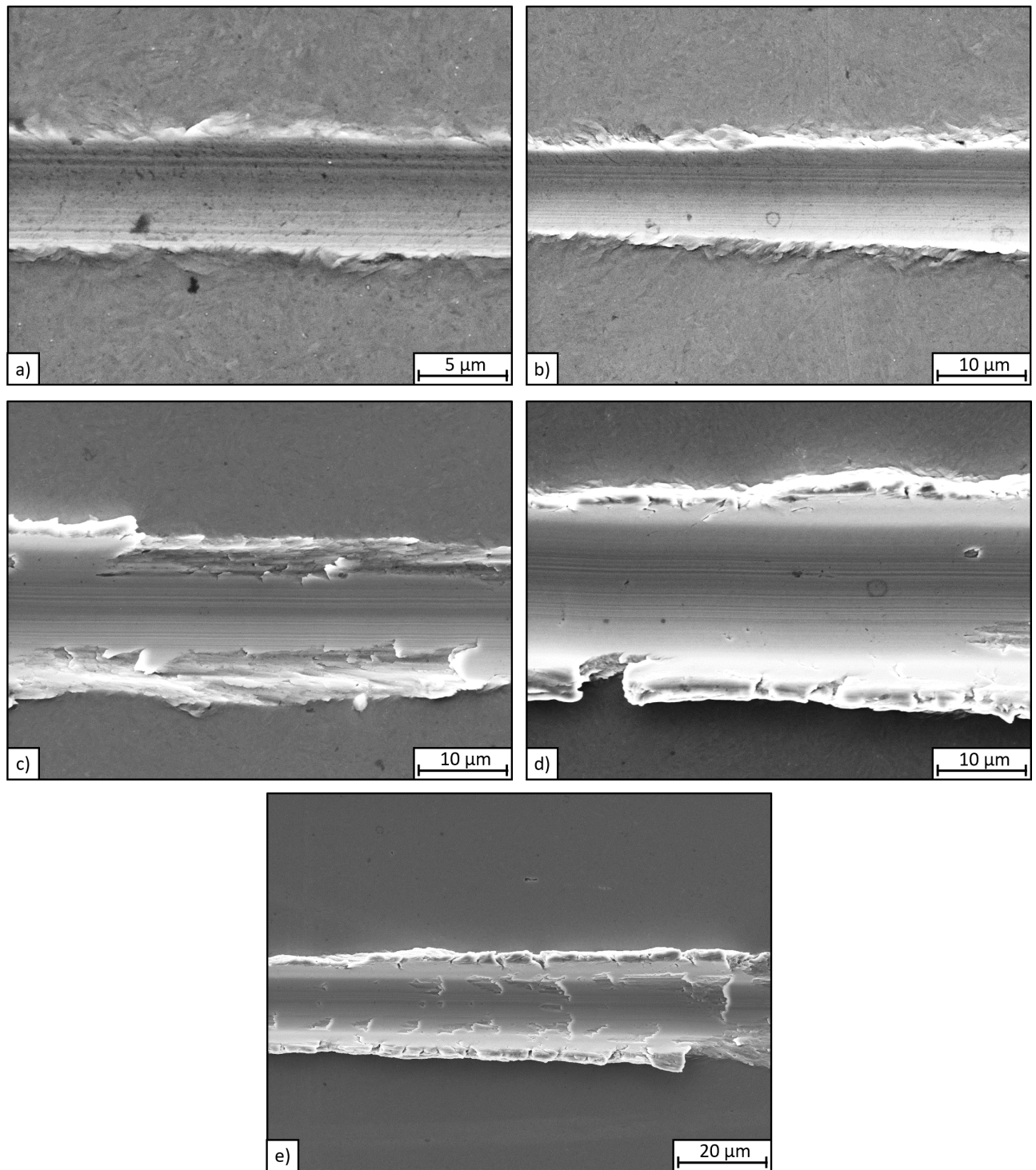


Abbildung 74: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen einer Einzelritzspur des 80CrV2 (1.2235) in der 90°-Ausrichtung. Die Aufnahmen zeigen die Ritzpositionen bei a) 10 000-facher Vergrößerung nach 200 µm, b) bei 5000-facher Vergrößerung nach 400 µm, c) 600 µm, d) 800 µm und bei 2000-facher Vergrößerung nach 1000 µm Ritzlänge.

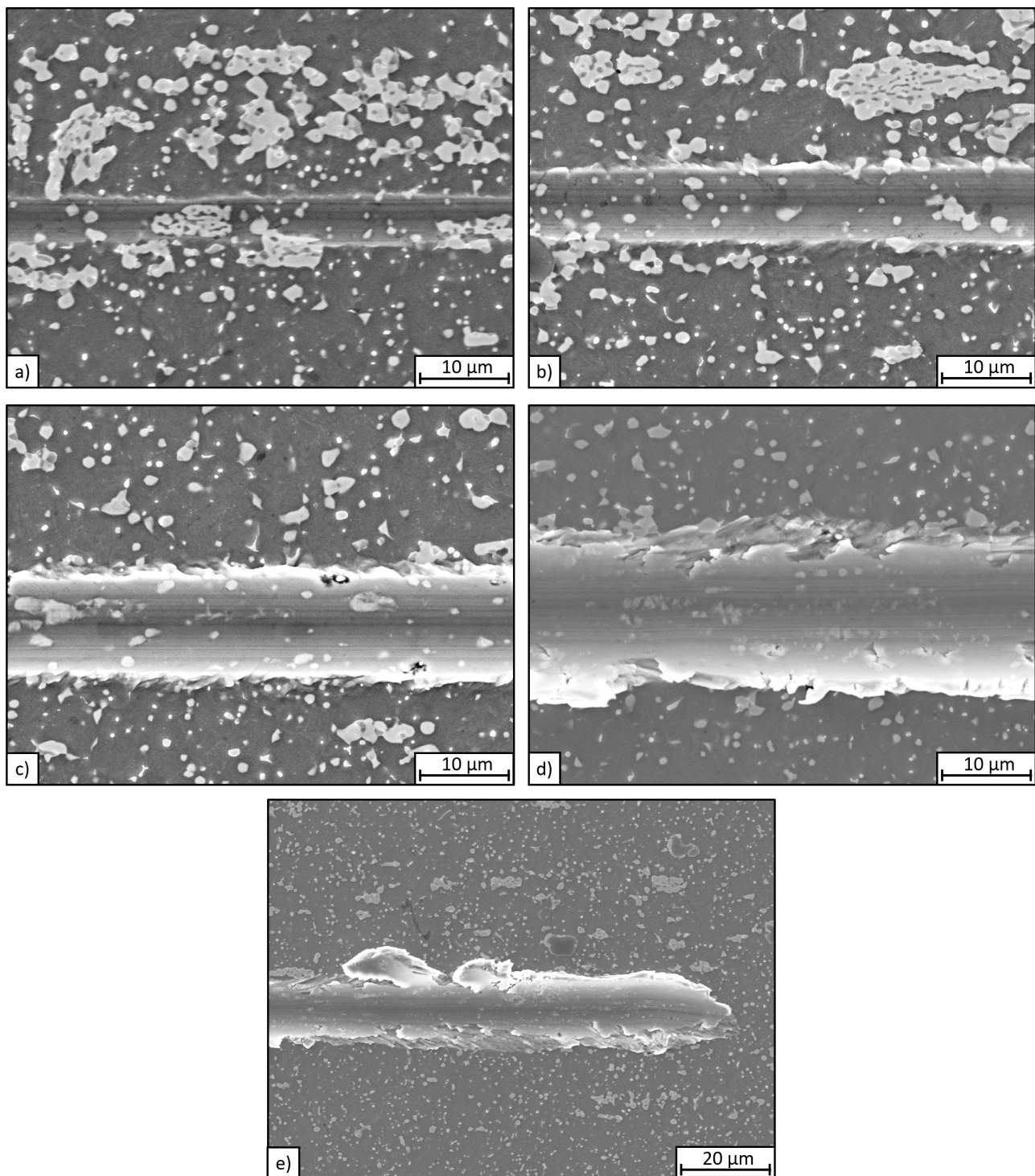


Abbildung 75: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen einer Einzelritzspur des 75Cr1 (1.2003) in der 90°-Ausrichtung. Die Aufnahmen zeigen die Ritzpositionen bei 5000-facher Vergrößerung nach a) 200 μm, b) 400 μm, c) 600 μm, d) 800 μm und bei 2000-facher Vergrößerung nach 1000 μm Ritzlänge.

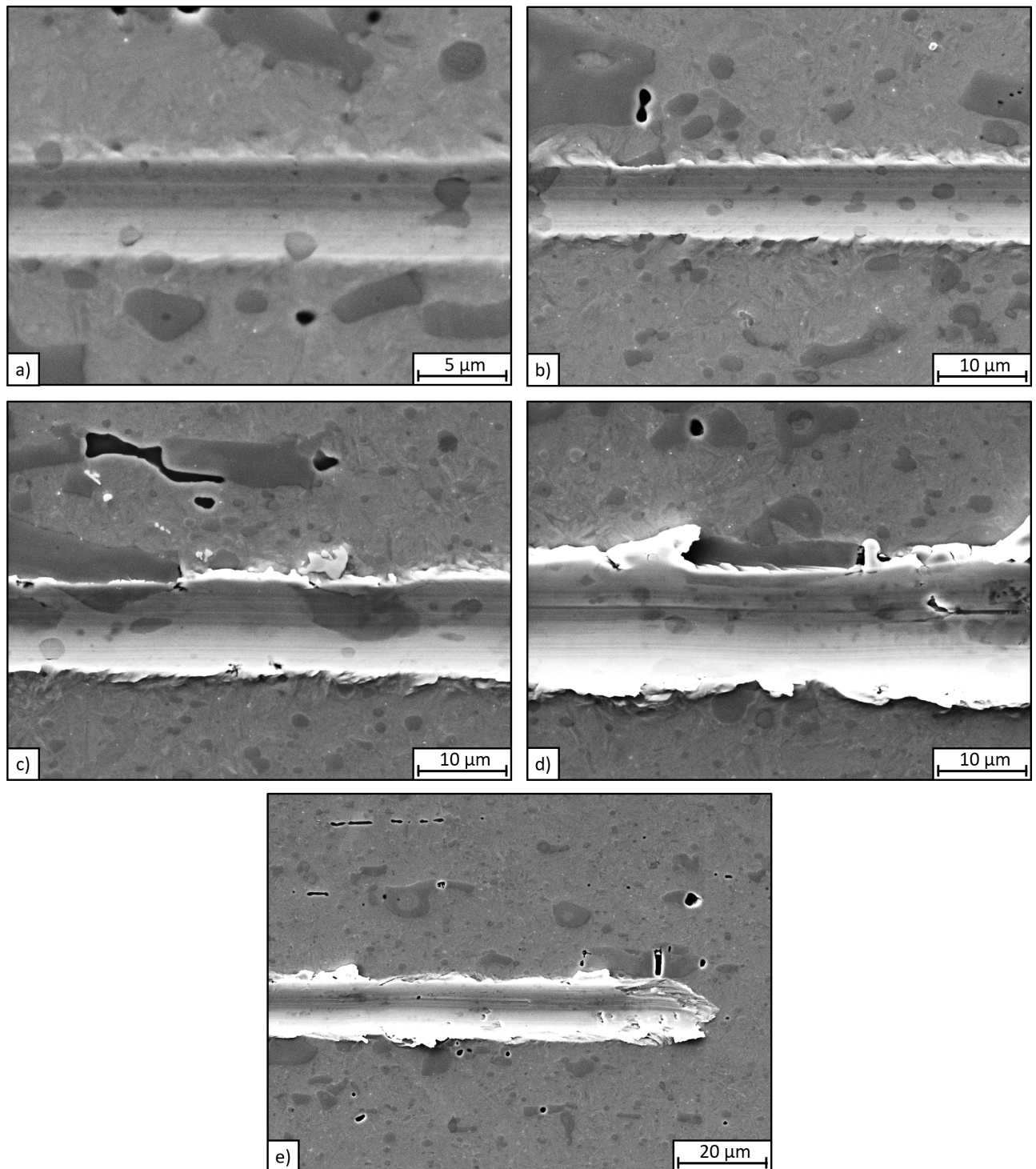


Abbildung 76: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen einer Einzelritzspur des X153CrMoV12 (1.2379) parallel zur Karbidzeiligkeit in der 90° -Ausrichtung. Die Aufnahmen zeigen die Ritzpositionen bei a) 10 000-facher Vergrößerung nach 200 μm , b) bei 5000-facher Vergrößerung nach 400 μm , c) 600 μm , d) 800 μm und bei 2000-facher Vergrößerung nach 1000 μm Ritzlänge.

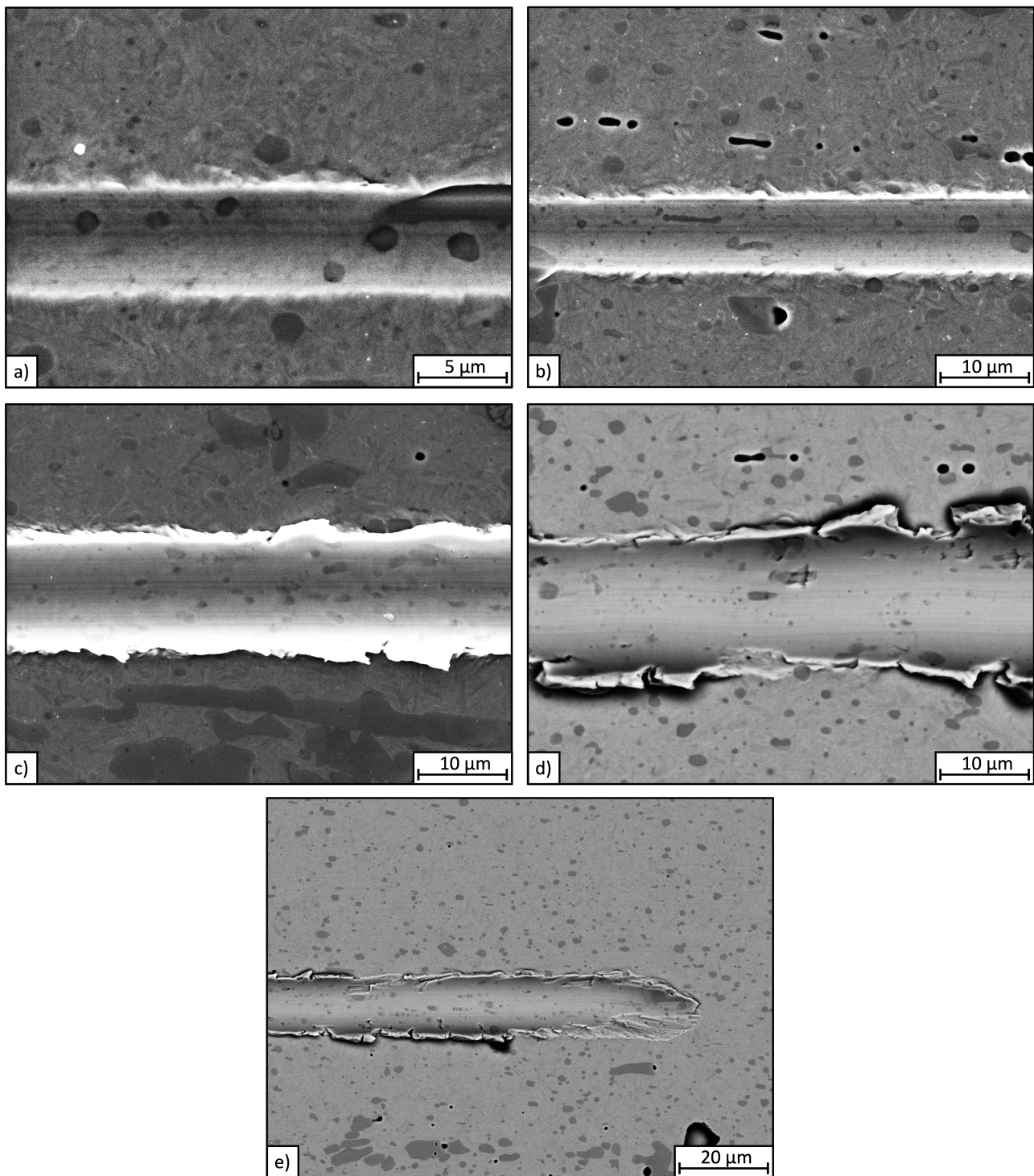


Abbildung 77: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen einer Einzelritzspur des X153CrMoV12 (1.2379) senkrecht zur Karbidzeiligkeit in der 90°-Ausrichtung. Die Aufnahmen zeigen die Ritzpositionen bei a) 10 000-facher Vergrößerung nach 200 µm, b) bei 5000-facher Vergrößerung nach 400 µm, c) 600 µm, d) 800 µm und bei 2000-facher Vergrößerung nach 1000 µm Ritzlänge. Bei den Aufnahmen d) und e) handelt es sich um BSE-Aufnahmen.

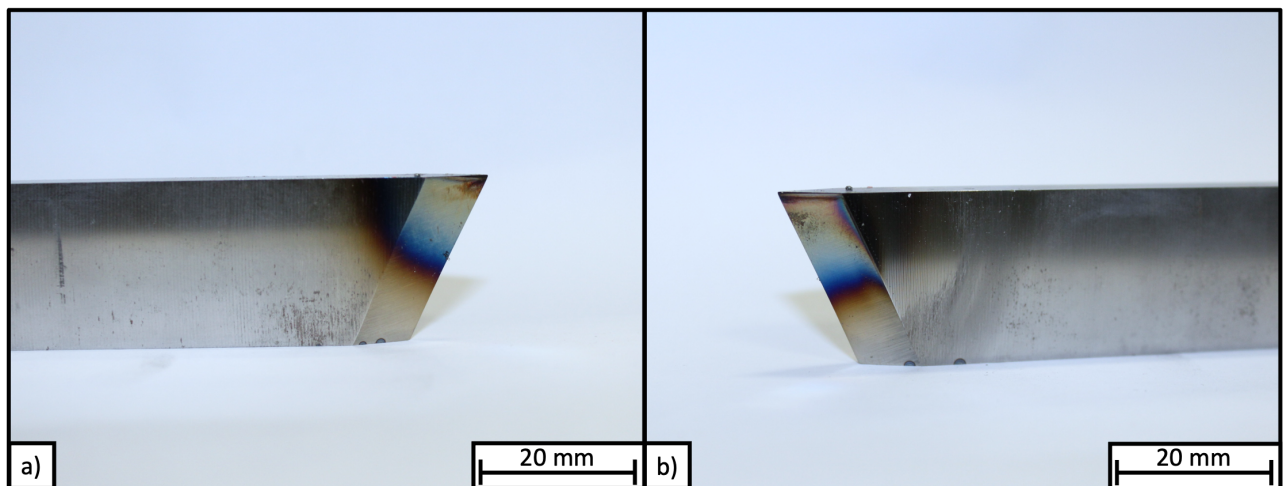


Abbildung 78: Makroskopische Aufnahme der Drechselbeitelspitze aus 80CrV2 (1.2235) nach den Drechselversuchen. a) Rechte Seite der Drechselbeitelspitze. b) Linke Seite der Drechselbeitelspitze.

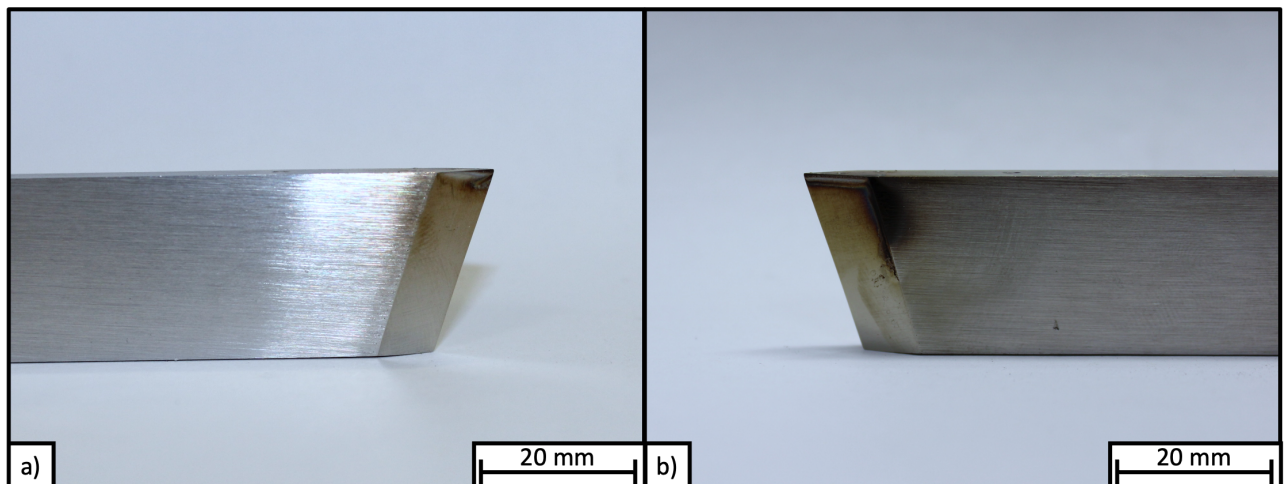


Abbildung 79: Makroskopische Aufnahme der Drechselbeitelspitze aus HS6-5-2C (1.3343) nach den Drechselversuchen. a) Rechte Seite der Drechselbeitelspitze. b) Linke Seite der Drechselbeitelspitze.

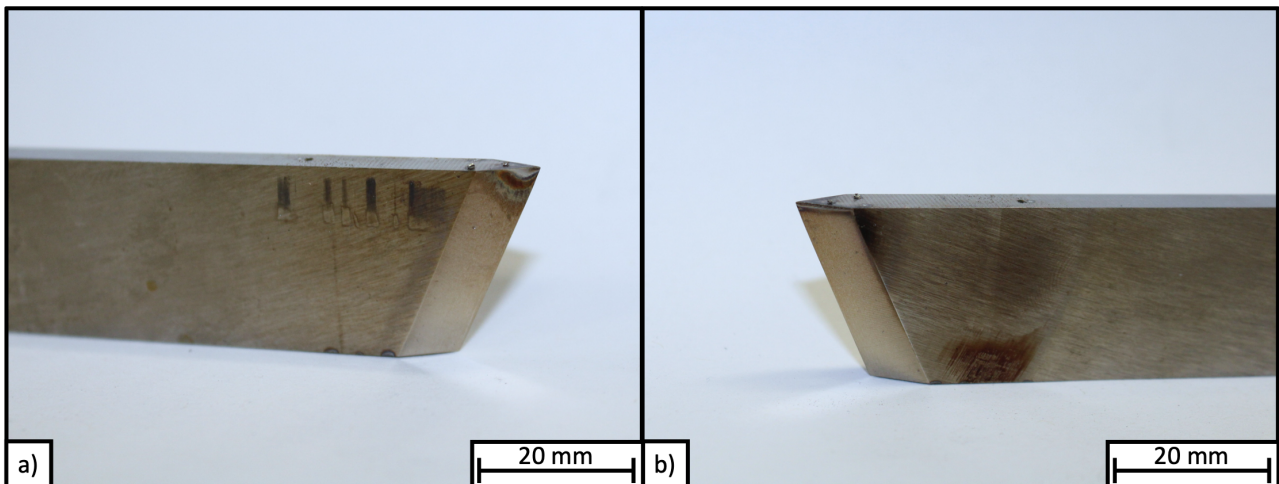


Abbildung 80: Makroskopische Aufnahme der Drehseibitelspitze aus X153CrMoV12 Längs (1.2379) nach den Drechselversuchen. a) Rechte Seite der Drehseibitelspitze. b) Linke Seite der Drehseibitelspitze.

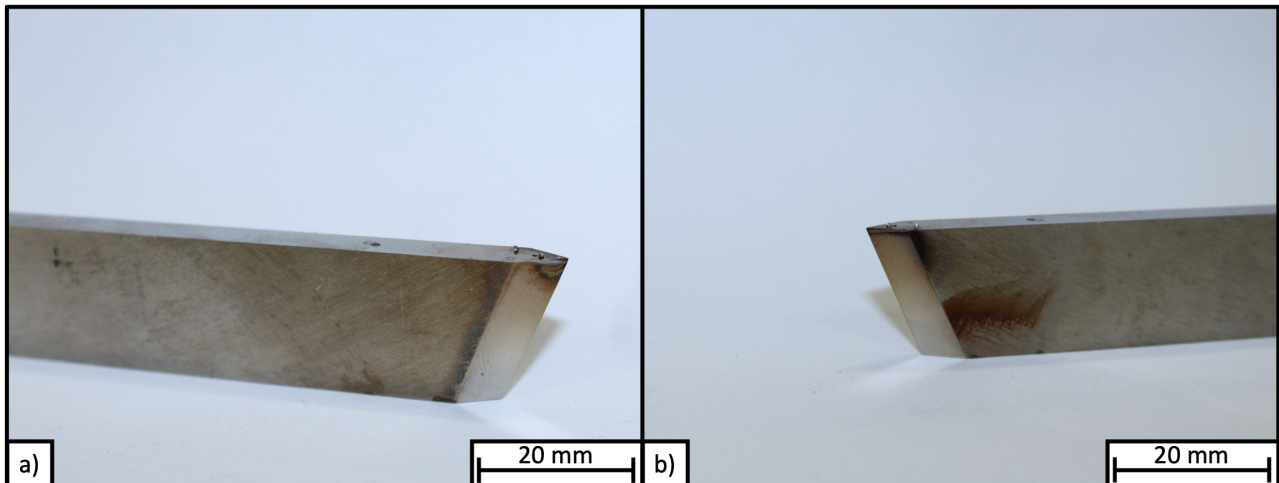


Abbildung 81: Makroskopische Aufnahme der Drehseibitelspitze aus X153CrMoV12 Quer (1.2379) nach den Drechselversuchen. a) Rechte Seite der Drehseibitelspitze. b) Linke Seite der Drehseibitelspitze.

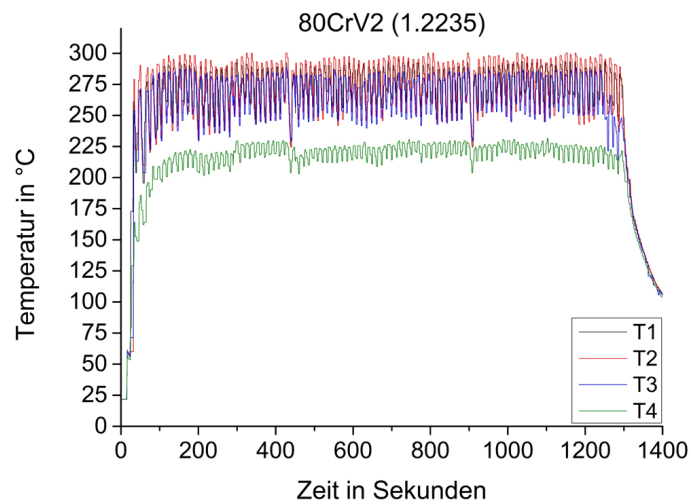


Abbildung 82: Vollständige Temperaturkurven für den Versuchsdurchlauf mit dem Standard-Drehselmeißel aus dem Material 80CrV2 (1.2235).

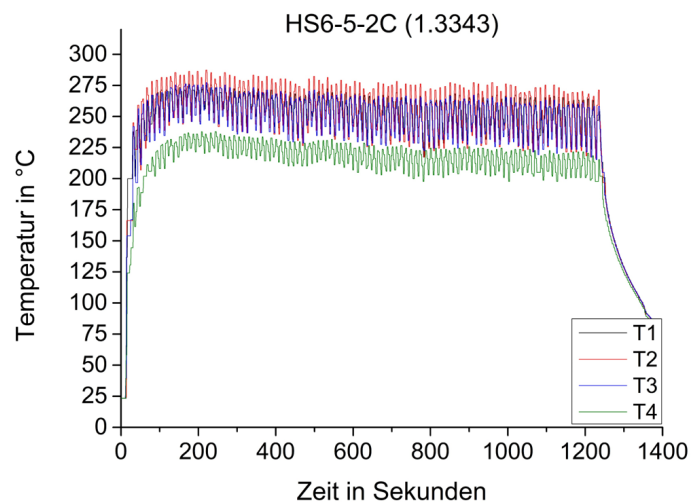


Abbildung 83: Vollständige Temperaturkurven für den Versuchsdurchlauf mit dem High-Performance-Drehselmeißel aus dem Material HS6-5-2C (1.3343).

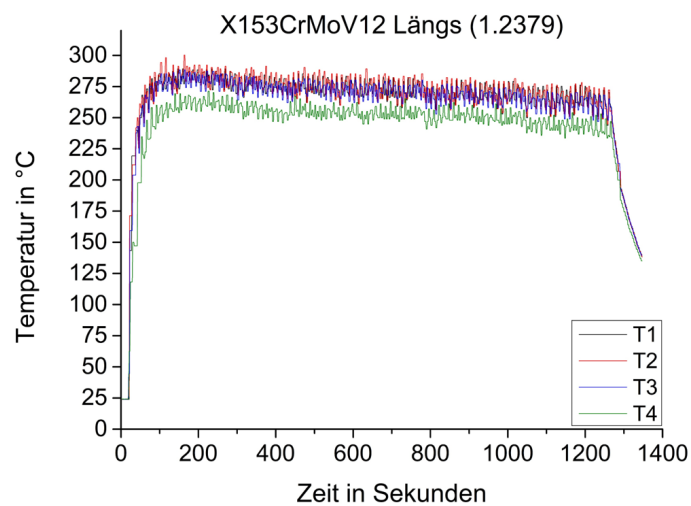


Abbildung 84: Vollständige Temperaturkurven für den Versuchsdurchlauf mit dem Standard-Drehselmeißel aus dem Material X153CrMoV12 (1.2379) mit der parallelen Karbidausrichtung.

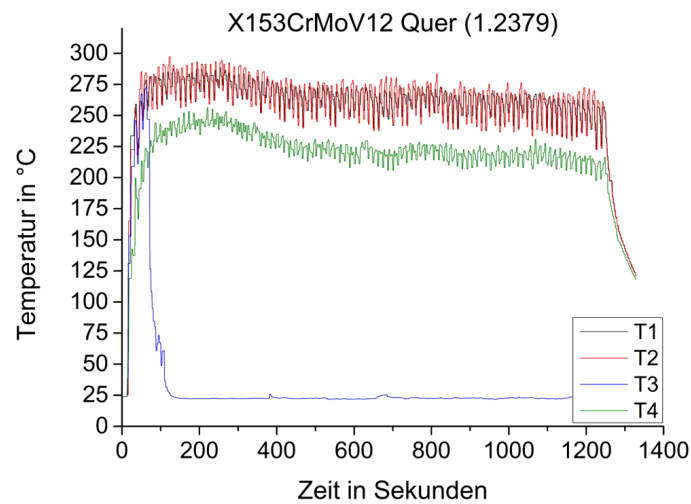


Abbildung 85: Vollständige Temperaturkurven für den Versuchsdurchlauf mit dem Standard-Drehseimeißei aus dem Material X153CrMoV12 (1.2379) mit der senkrechten Karbidausrichtung.

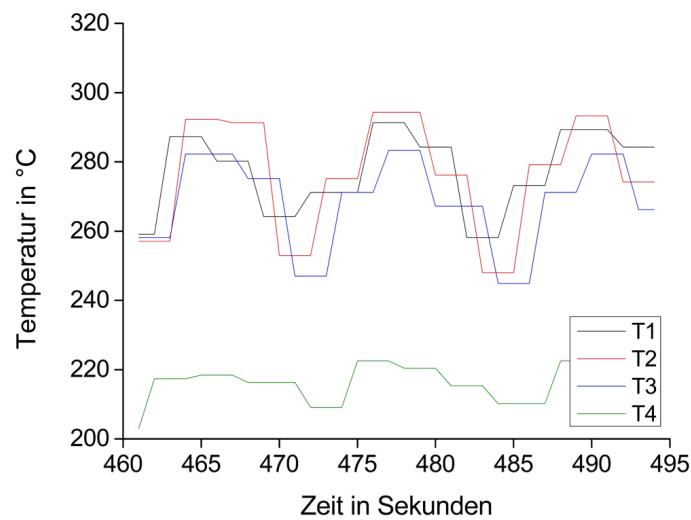


Abbildung 86: Detailansicht dreier Amplituden am Beispiel des Versuchsdurchlaufes mit dem Standard-Drehseimeißei aus dem Material 80CrV2 (1.2235).

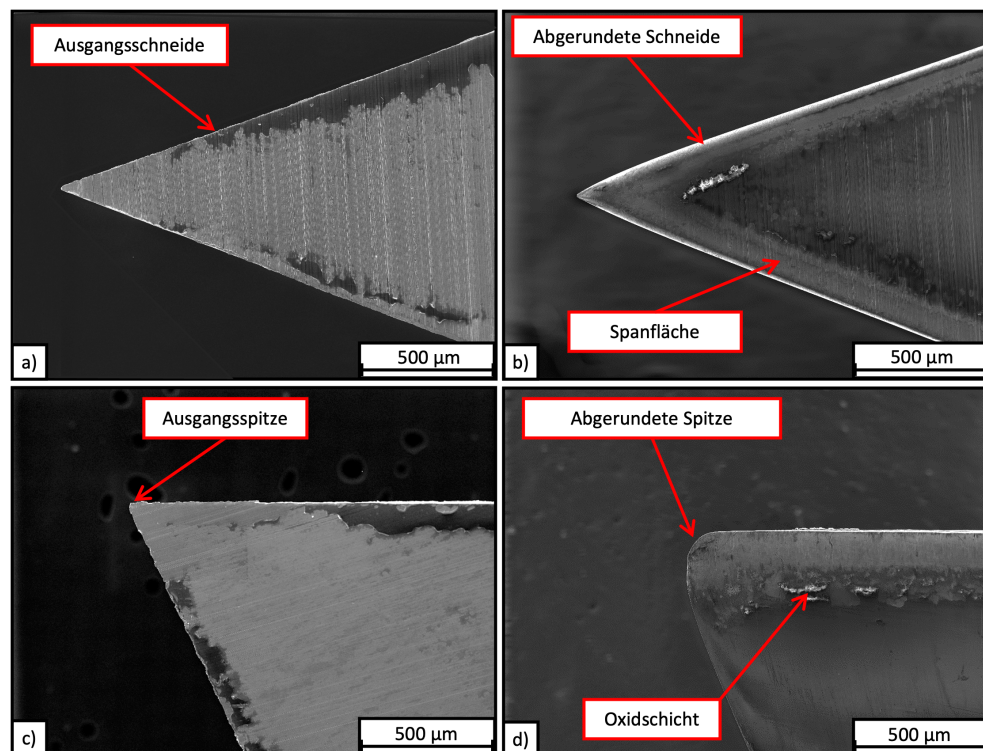


Abbildung 87: SE-Aufnahme der Standard-Drehelmeißelspitze aus dem Material 80CrV2 (1.2235) mit 150-facher Vergrößerung. a) Draufsicht unbenutzt, b) Draufsicht benutzt, c) Seitenansicht unbenutzt, d) Seitenansicht benutzt.

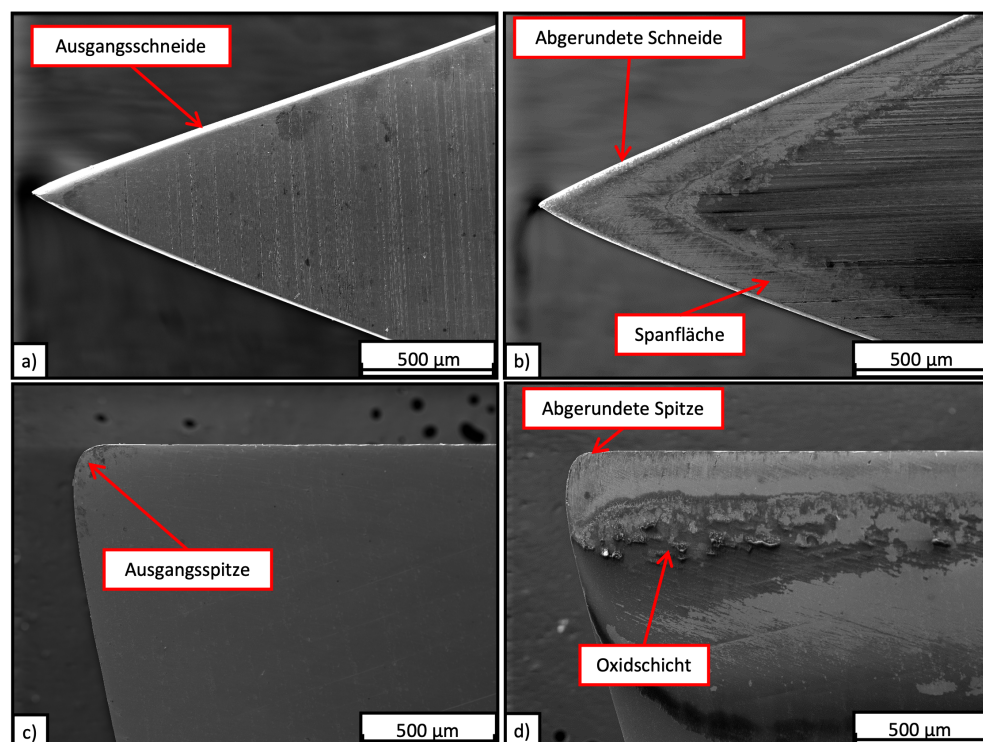


Abbildung 88: SE-Aufnahme der High-Performance-Drehelmeißelspitze aus dem Material HS6-5-2C (1.3343) mit 150-facher Vergrößerung. a) Draufsicht unbenutzt, b) Draufsicht benutzt, c) Seitenansicht unbenutzt, d) Seitenansicht benutzt.

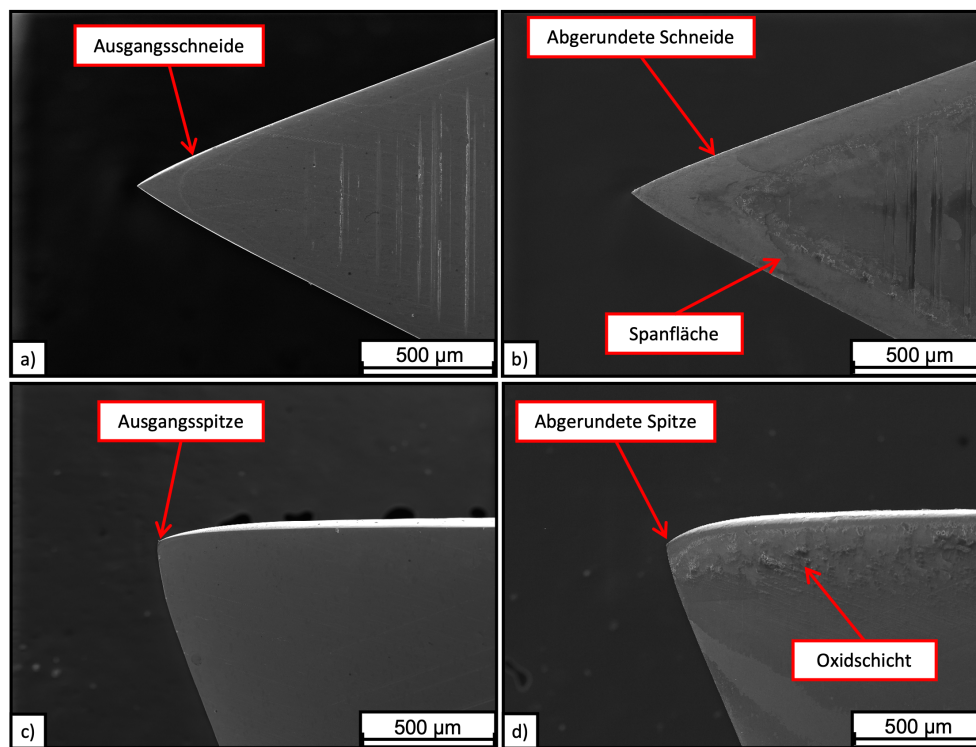


Abbildung 89: SE-Aufnahme der Repurpose-Drehselmeißelspitze aus dem Material X153CrMoV12 (1.2379) mit paralleler Karbidzeiligkeit bei 150-facher Vergrößerung. a) Draufsicht unbenutzt, b) Draufsicht benutzt, c) Seitenansicht unbenutzt, d) Seitenansicht benutzt.

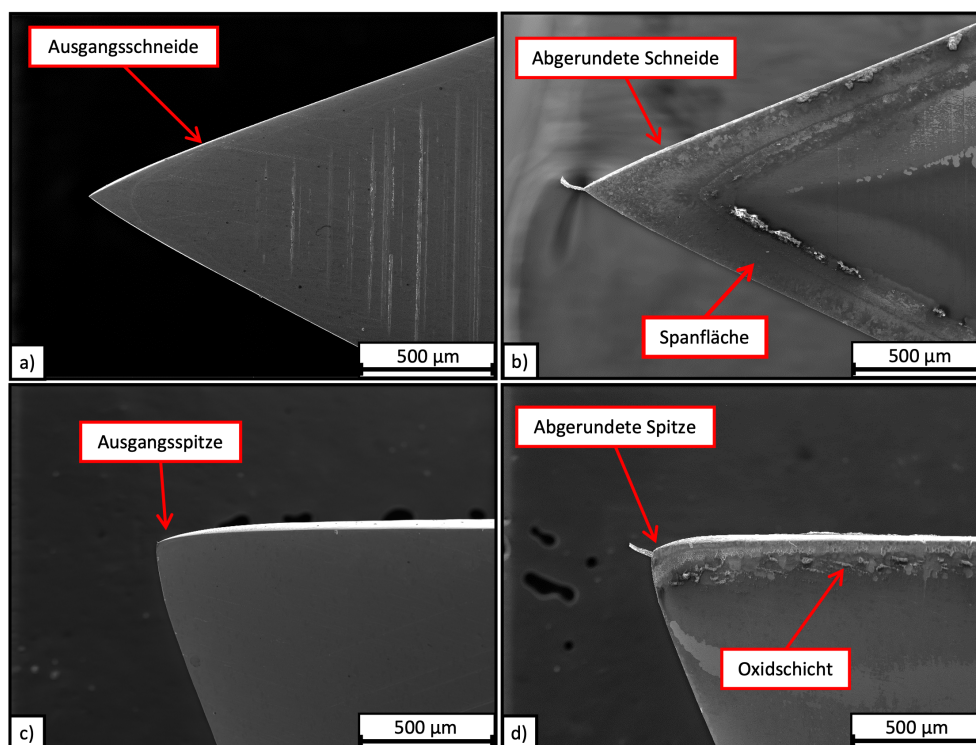


Abbildung 90: SE-Aufnahme der Repurpose-Drehselmeißelspitze aus dem Material X153CrMoV12 (1.2379) mit senkrechter Karbidzeiligkeit bei 150-facher Vergrößerung. a) Draufsicht unbenutzt, b) Draufsicht benutzt, c) Seitenansicht unbenutzt, d) Seitenansicht benutzt.

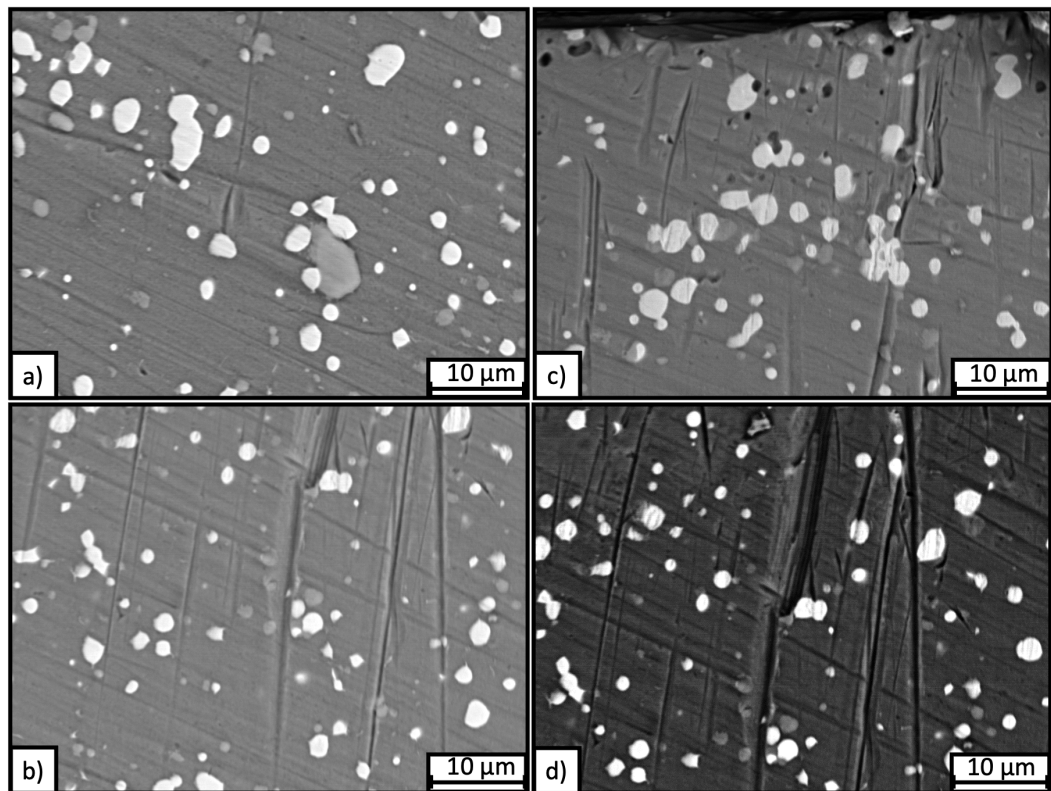


Abbildung 91: SE-Aufnahmen der Oberfläche des High-Performance-Drehselmeißel aus dem Material HS6-5-2C (1.3343). Zu sehen sind die sichtbaren Furchen und Karbide mit 5000-facher Vergrößerung. Es wird die Wirkweise von Karbiden im Material hinsichtlich abrasivem Verschleiß verdeutlicht. a) Stoppen von Riefen, b) Karbide als abrasives Teilchen, c) Umlenken von Riefen, d) Detektion von Rückstreuelektroden kann Aufschluss über die verschiedenen Karbidtypen geben.

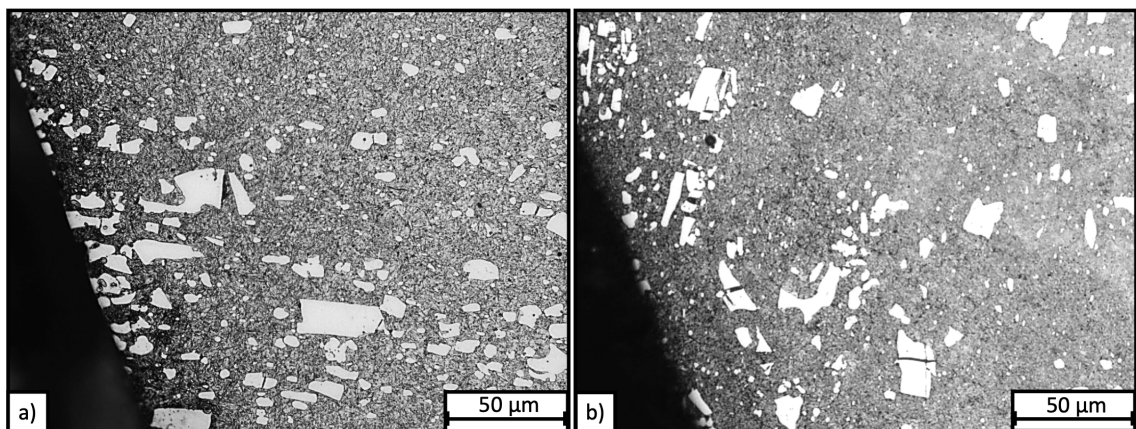


Abbildung 92: Lichtmikroskopische Aufnahme bei 500-facher Vergrößerung der Repurpose-Drehselmeißel Schneide aus dem Stahl X153CrMoV12 (1.2379) mit den Karbidausrichtungen a) Karbidausrichtung parallel b) Karbidausrichtung senkrecht

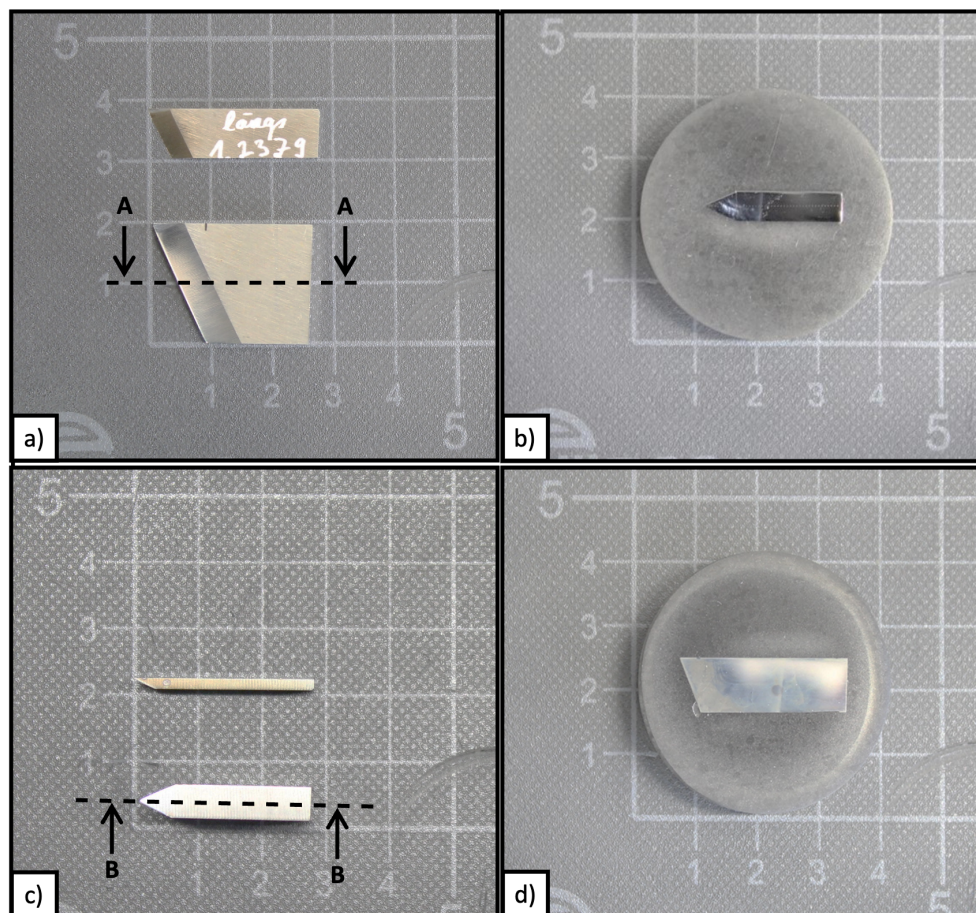


Abbildung 93: a) Die Werkzeugspitze wird durch die rot gekennzeichnete Schnittlinie in eine obere und untere Hälfte getrennt. Die daraus resultierende obere Werkzeugspitze ist oben in a) abgebildet. b) Die untere Werkzeugspitze wird eingebettet. c) Die obere Werkzeugspitze wird entlang der eingezeichneten Schnittlinie erneut getrennt. d) Die daraus resultierende rechte Hälfte wird ebenfalls eingebettet.

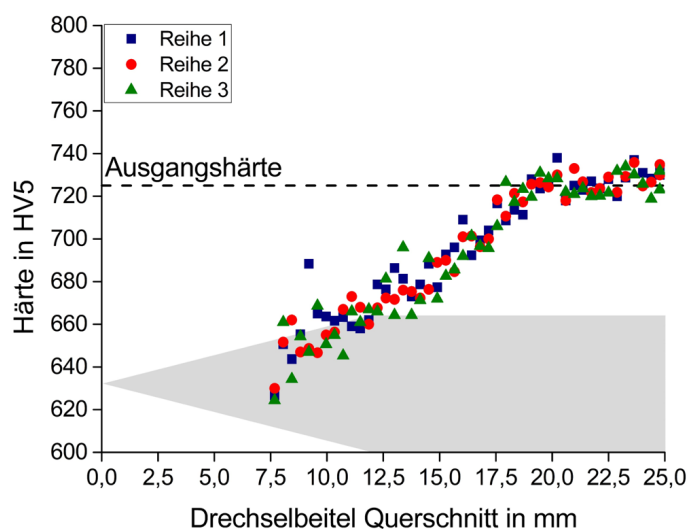


Abbildung 94: Darstellung der Messergebnisse der Härtemessung am Schnitt A-A an dem Werkzeug aus dem Material 80CrV2 (1.2235).

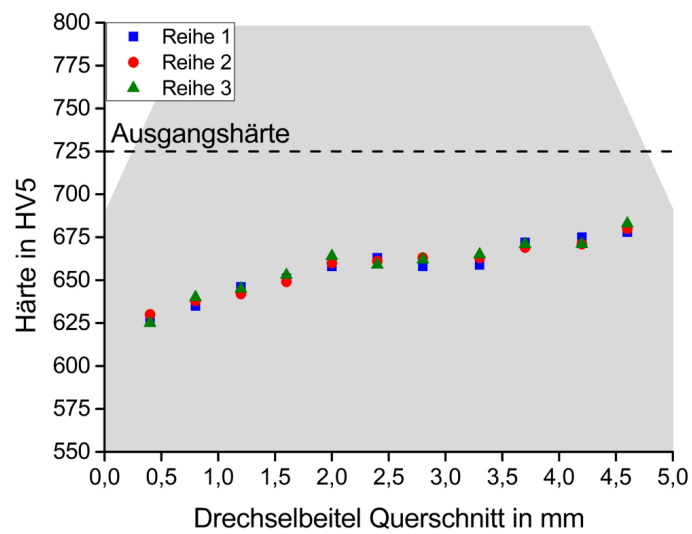


Abbildung 95: Darstellung der Messergebnisse der Härtemessung am Schnitt A-A an dem Werkzeug aus dem Material 80CrV2 (1.2235).

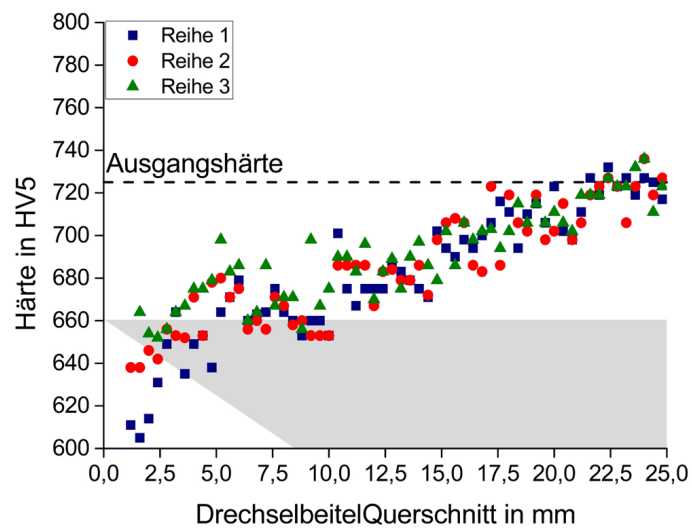


Abbildung 96: Darstellung der Messergebnisse der Härtemessung am Schnitt B-B an dem Werkzeug aus dem Material 80CrV2 (1.2235).

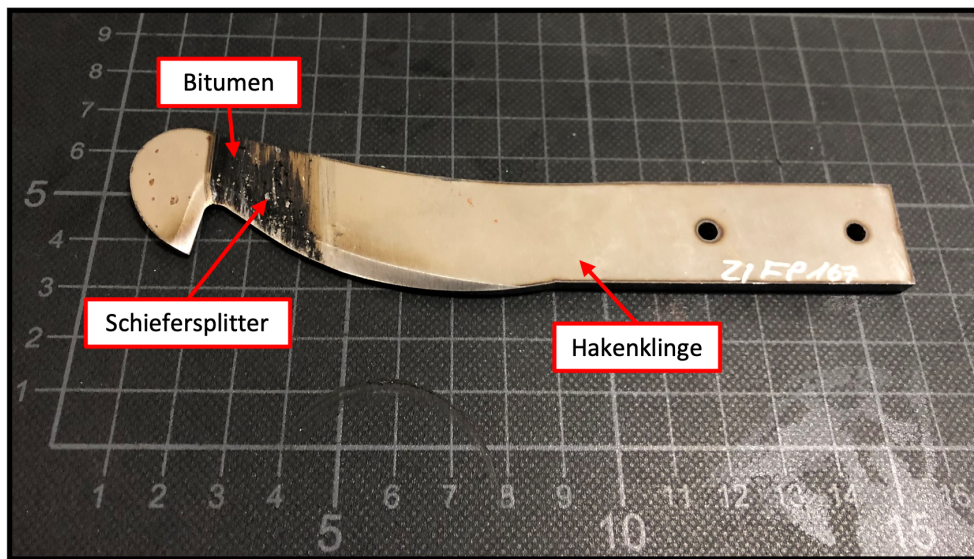


Abbildung 97: Darstellung der Hakenklinge nach 50 Zyklen im Schneidleistungstest. Zu sehen sind Klebereste durch Bitumen an der Seitenfläche des Schneidenbereiches.

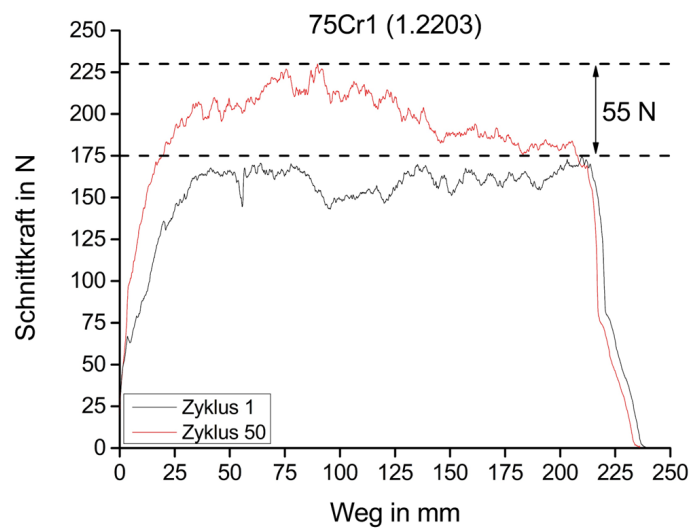


Abbildung 98: Kraft-Weg-Diagramm des Schneidzeugs aus dem Werkstoff 75Cr1 (1.2203). Der schwarze Graph stellt die benötigte Schnittkraft nach dem ersten Zyklus und der rote Graph die Schnittkraft nach 50 Zyklen dar.

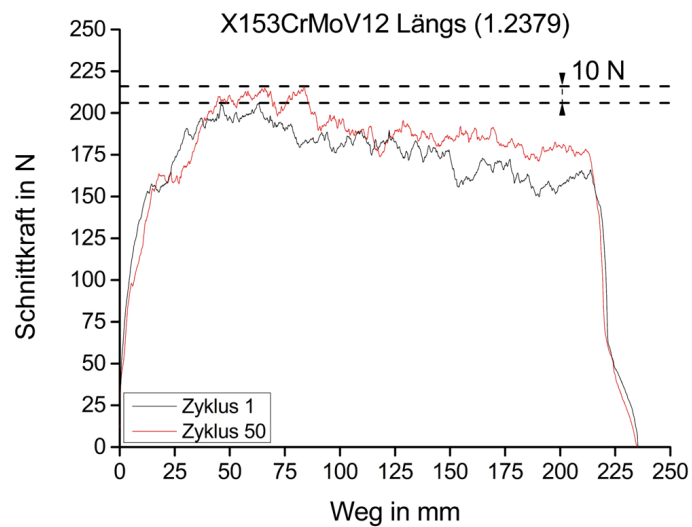


Abbildung 99: Kraft-Weg-Diagramm des Schneidzeugs aus dem Werkstoff X153CrMoV12 (1.2379) mit einer Karbidausrichtung längs zur Schneide. Der schwarze Graph stellt den Verlauf der Schnittkraft des ersten Zyklus und der rote Graph die Schnittkraft nach 50 Zyklen dar.

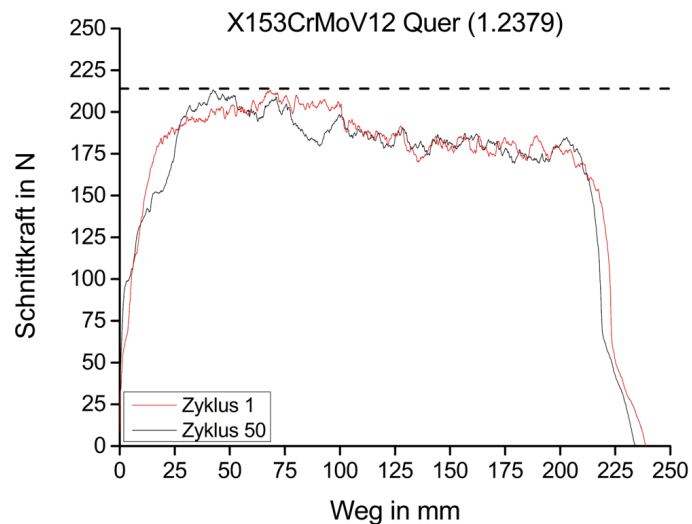


Abbildung 100: Kraft-Weg-Diagramm des Schneidzeugs aus dem Werkstoff X153CrMoV12 (1.2379) mit einer Karbidausrichtung quer zur Schneide. Der schwarze Graph stellt den Verlauf der Schnittkraft des ersten Zyklus und der rote Graph die Schnittkraft nach 50 Zyklen dar.

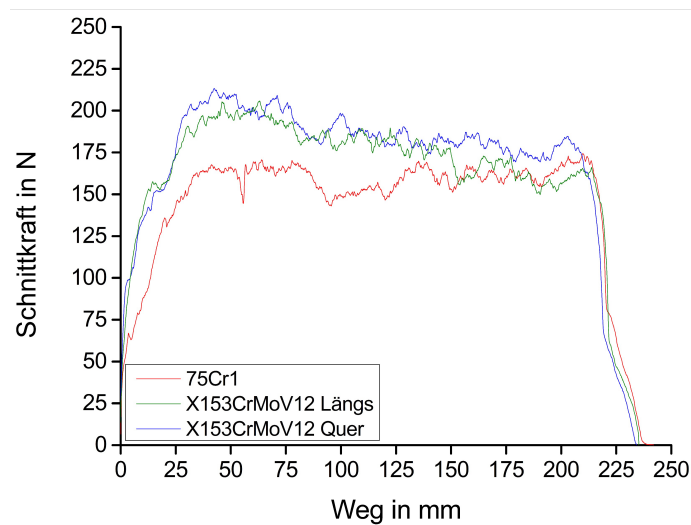


Abbildung 101: Vergleich der Schnittkraft nach dem ersten Zyklus. Der rote Graph gibt die Schnittkraft der Hakenklinge aus dem Werkstoff 75Cr1 (1.2003), der grüne Graph aus dem Werkstoff X153CrMoV12 (1.2379) längs und der blaue Graph mit der Karbidausrichtung quer zur Schneide wieder.

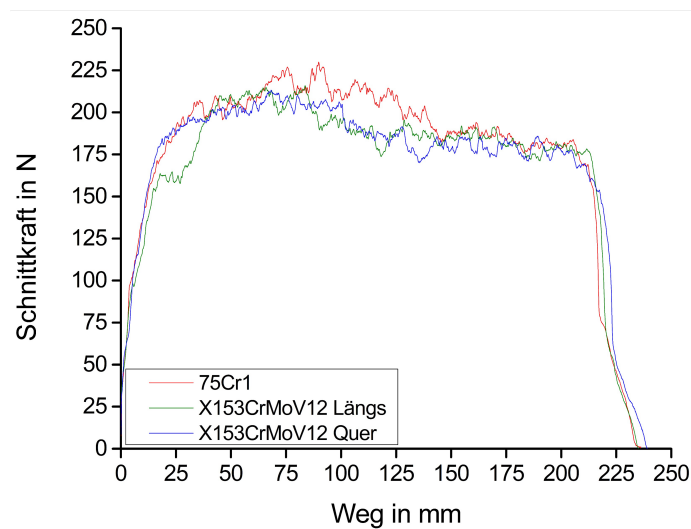


Abbildung 102: Vergleich der Schnittkraft nach dem ersten Zyklus. Der rote Graph gibt die Schnittkraft der Hakenklinge aus dem Werkstoff 75Cr1 (1.2003), der grüne Graph aus dem Werkstoff X153CrMoV12 (1.2379) längs und der blaue Graph mit der Karbidausrichtung quer zur Schneide wieder.

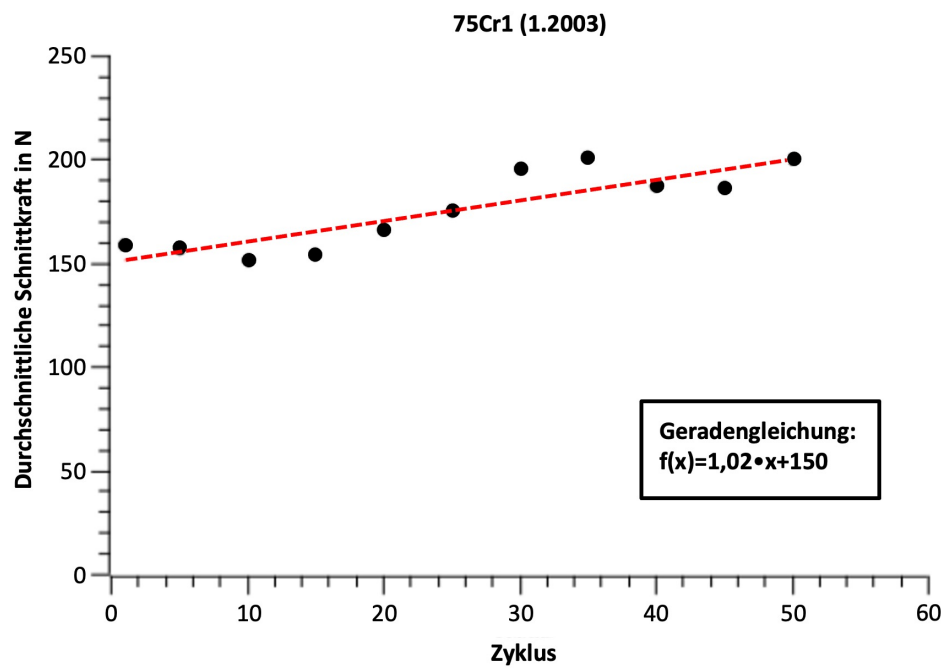


Abbildung 103: Ausgleichsgerade der Schnittkräfte von der konventionellen Hakenklinge aus 75Cr1 (1.2003).

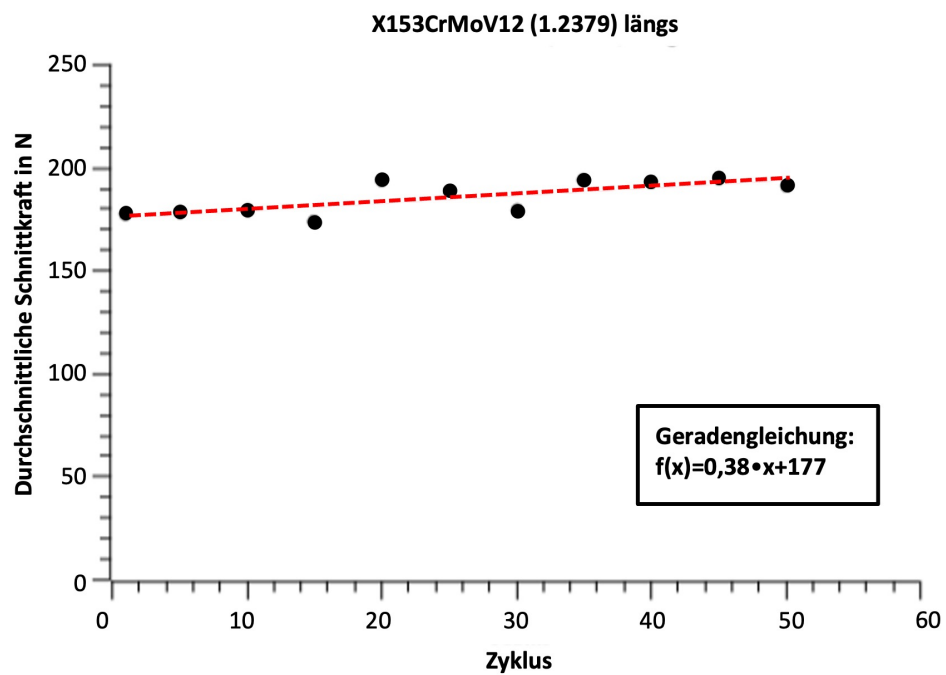


Abbildung 104: Ausgleichsgerade der Schnittkräfte von der Repurpose-Hakenklinge aus X153CrMoV12 (1.2379) mit der Karbidzeiligkeit parallel.

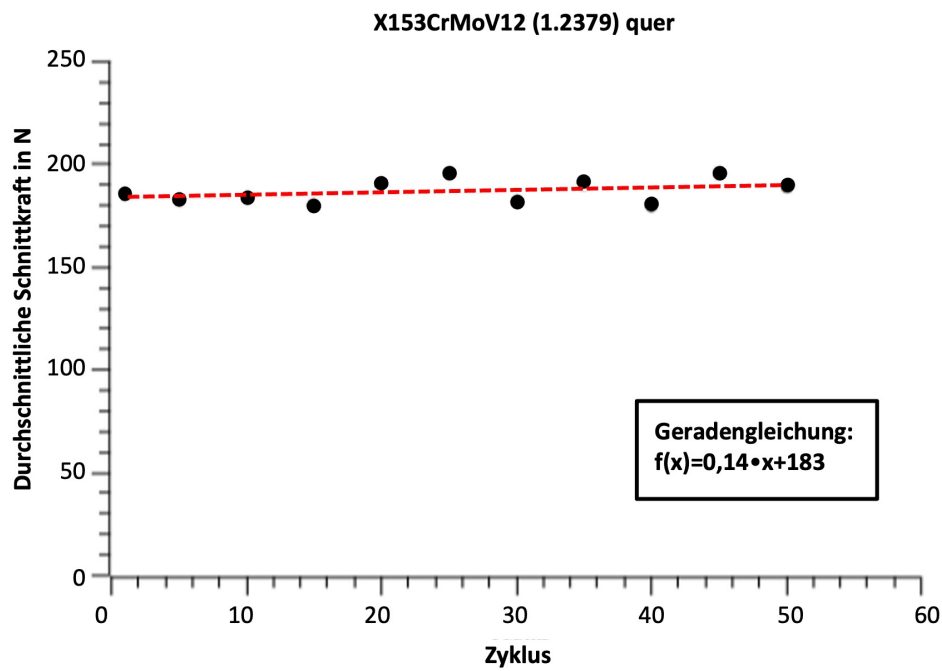


Abbildung 105: Ausgleichsgerade der Schnittkräfte von der Repurpose-Hakenklinge aus X153CrMoV12 (1.2379) mit der Karbidzeiligkeit senkrecht.



Abbildung 106: Die Hakenklinge wurde an den gekennzeichneten gestrichelten Linien getrennt. Die Probe A wurde als Querschliff eingebettet und analysiert. An der Probe B wurde die Schneide im REM analysiert.

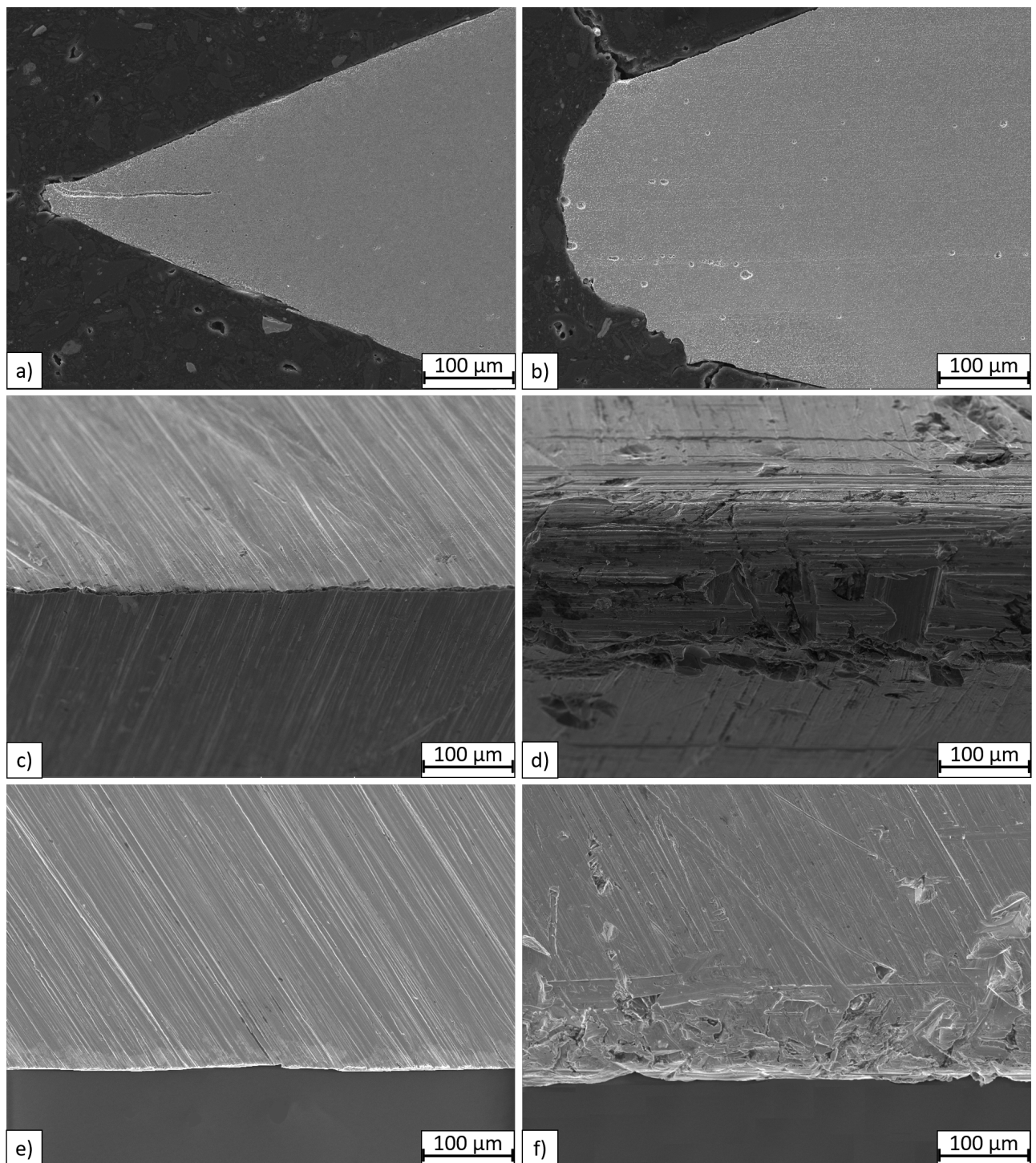


Abbildung 107: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Hakenklingschneide aus dem Werkstoff 75Cr1 (1.2003) mit 500-facher Vergrößerung. a) Schneidenquerschnitt vor dem Verschleißversuch b) nach dem Verschleißversuch c) Draufsicht im Ausgangszustand d) Draufsicht nach dem Verschleißversuch e) Seitenansicht im Ausgangszustand f) Seitenansicht nach dem Verschleißversuch

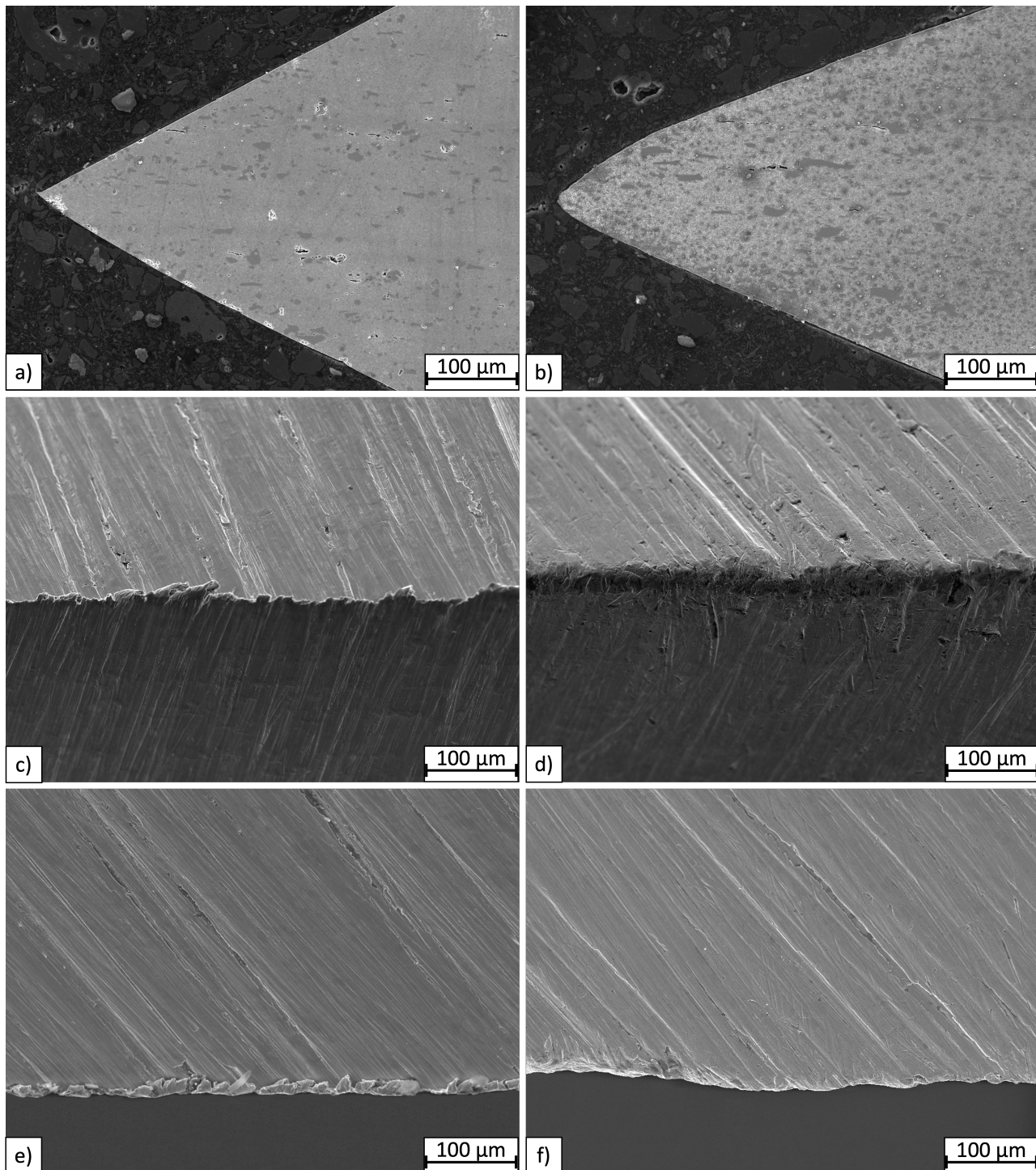


Abbildung 108: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Hakenklingschneide aus dem Werkstoff X153CrMoV12 (1.2379) - Karbidausrichtung Längs - mit 500-facher Vergrößerung. a) Schneidenquerschnitt vor dem Verschleißversuch b) nach dem Verschleißversuch c) Draufsicht im Ausgangszustand d) Draufsicht nach dem Verschleißversuch e) Seitenansicht im Ausgangszustand f) Seitenansicht nach dem Verschleißversuch

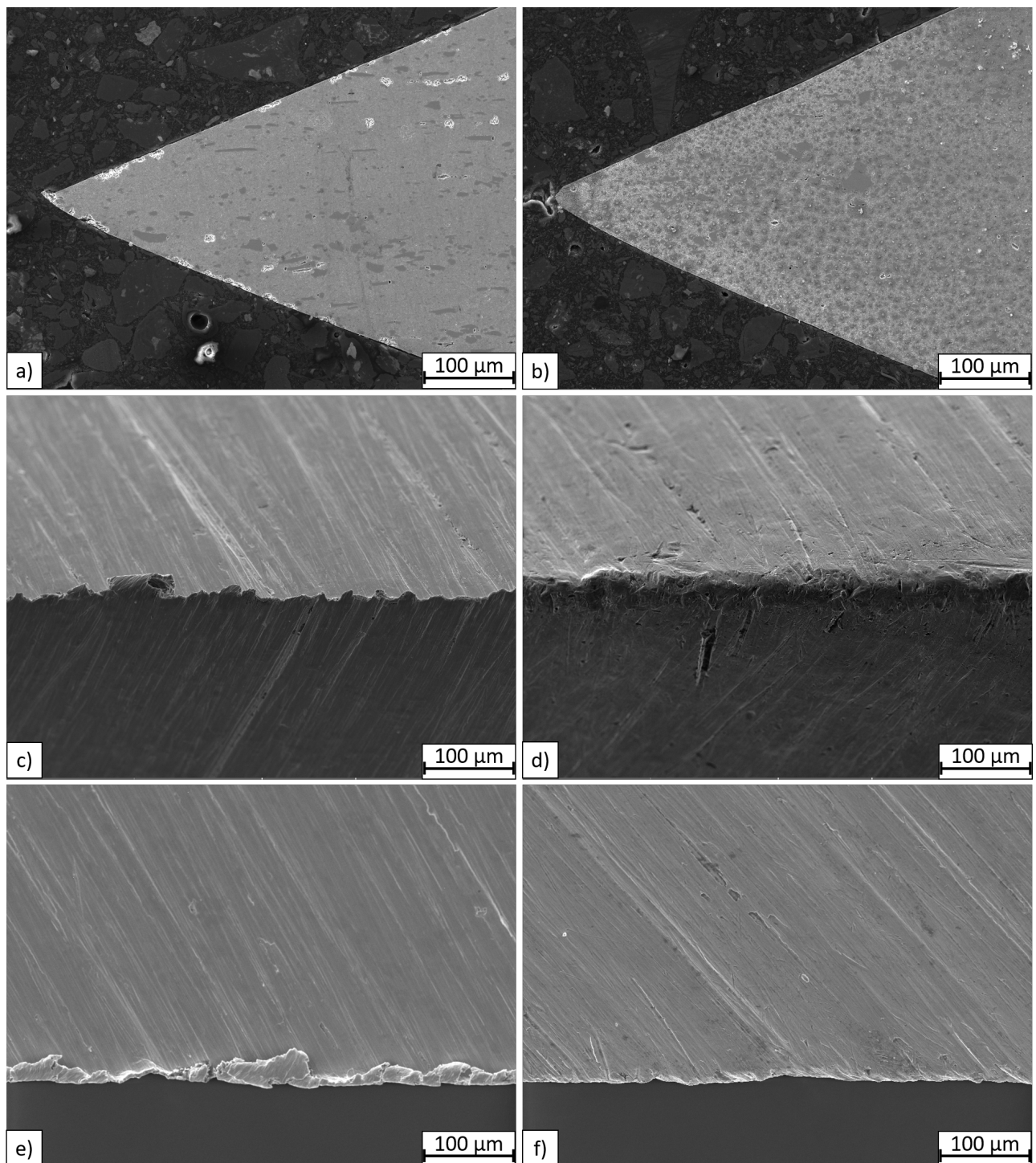


Abbildung 109: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Hakenklingschneide aus dem Werkstoff X153CrMoV12 (1.2379) - Karbidausrichtung Quer - mit 500-facher Vergrößerung. a) Schneidenquerschnitt vor dem Verschleißversuch b) nach dem Verschleißversuch c) Draufsicht im Ausgangszustand d) Draufsicht nach dem Verschleißversuch e) Seitenansicht im Ausgangszustand f) Seitenansicht nach dem Verschleißversuch

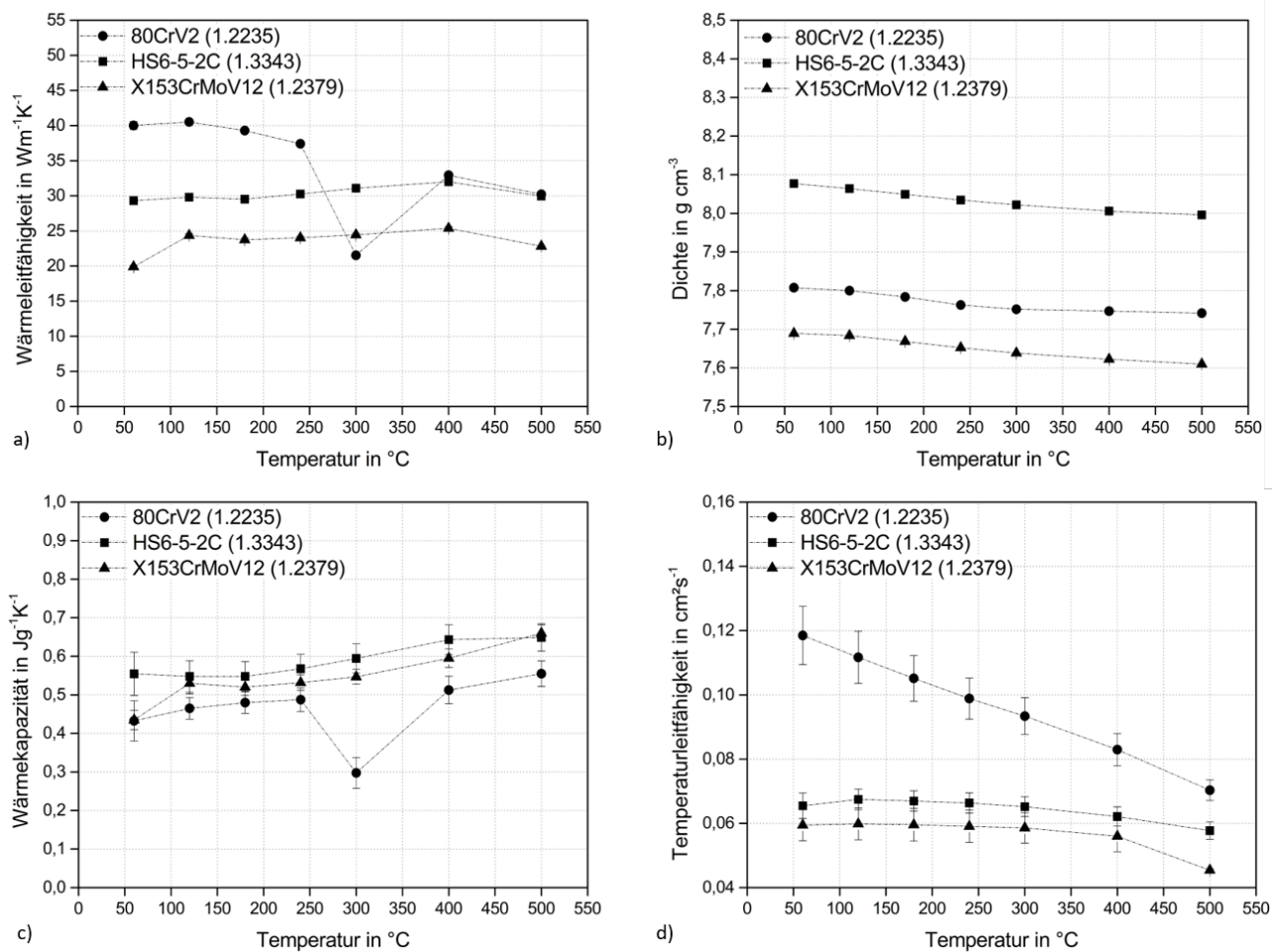


Abbildung 110: Temperaturabhängige Ergebnisse der a) Wärmeleitfähigkeit b) der Dichte c) der Wärmekapazität und d) der Temperaturleitfähigkeit der Stähle 80CrV2 (1.2235), HS6-5-2C (1.3343) und X153CrMoV12 (1.2379).

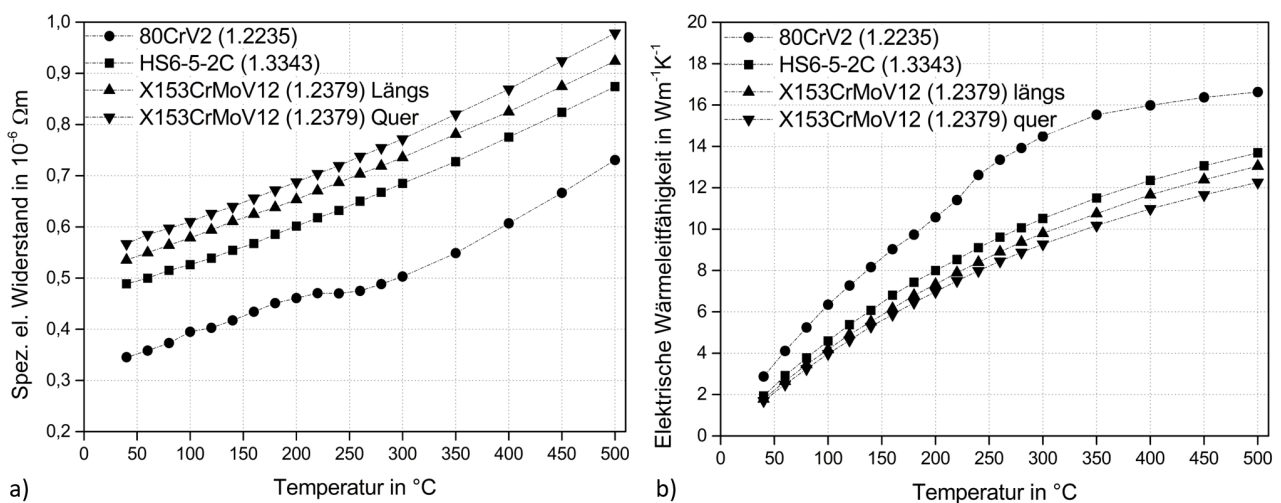


Abbildung 111: Temperaturabhängige Ergebnisse des a) spezifischen elektrischen Widerstandes und b) dem elektrischen Anteil der Wärmeleitfähigkeit der Stähle 80CrV2 (1.2235), HS6-5-2C (1.3343) und X153CrMoV12 (1.2379) in Abhängigkeit der Karbidzeiligkeit.

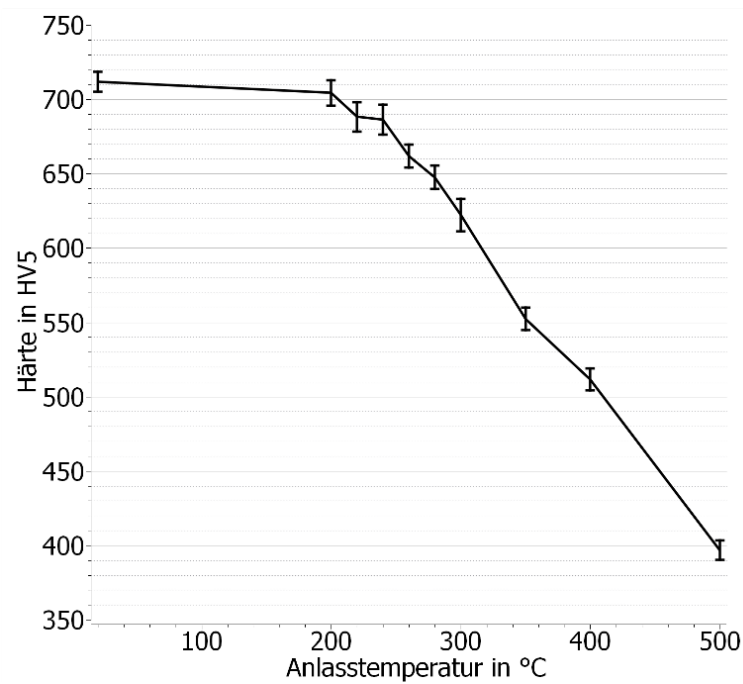


Abbildung 112: Anlassdiagramm für das Material 80CrV2 (1.2235) mit einer Anlassdauer von 70 min. Es ist die Härte in HV5 über der Anlasstemperatur

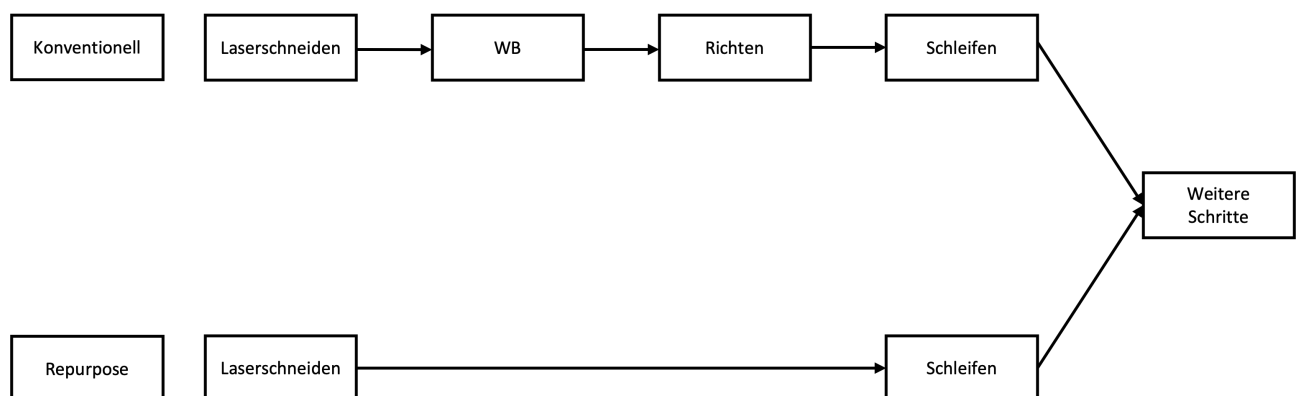


Abbildung 113: Vergleich der Fertigungsrouen der konventionellen Drechselmeißel und der Repurpose-Drechselmeißel. Zu sehen ist, dass bei den Repurpose-Drechselmeißeln signifikant weniger Arbeitsschritte nötig sind.

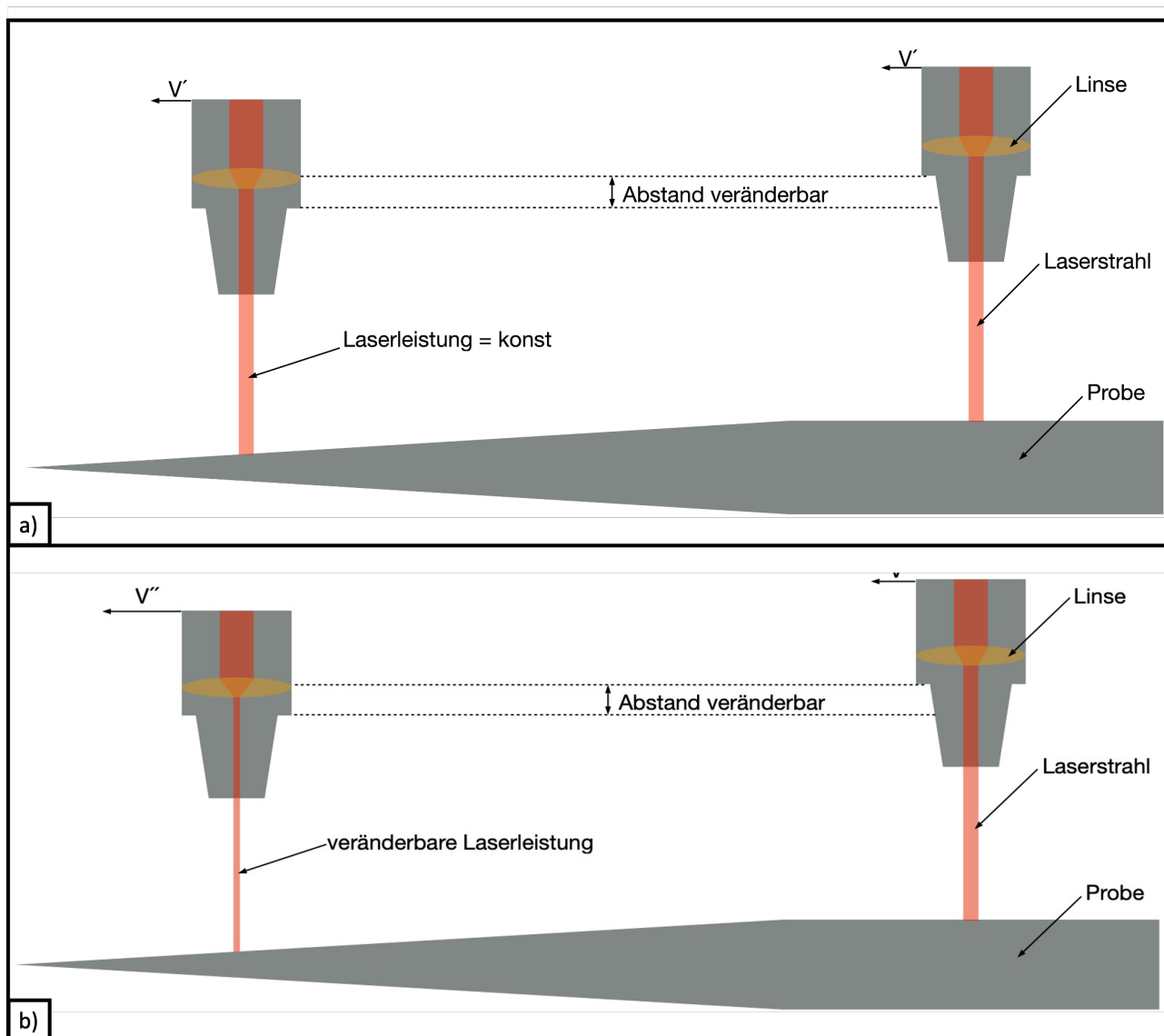


Abbildung 114: Die Abbildung zeigt schematisch das Prinzip bei der Herstellung der Laserstrahl geschnittenen Proben. a) Durch die konstant bleibende Laserleistung ist die im Laserstrahl enthaltene Energie deutlich zu hoch für die geringeren Materialstärken. Die Vorschubgeschwindigkeit ist während des gesamten Trennvorgangs konstant ($V' = \text{konst.}$). b) Durch die Messung des Abstandes zwischen der Fokussierlinse und der Materialoberfläche kann die aktuelle Materialstärke bestimmt werden. Dadurch können alle Laserparameter auf die aktuelle Materialstärke eingestellt werden. Die Vorschubgeschwindigkeit kann dadurch erhöht werden ($V'' > V'$). Die variable Laserleistung ist in der Abbildung durch die unterschiedliche Breite des Laserstrahls dargestellt.

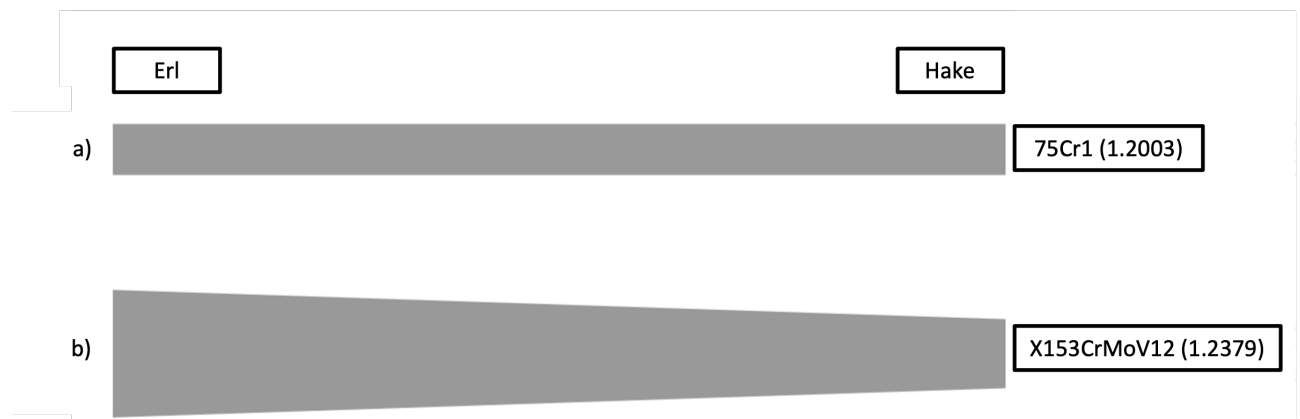


Abbildung 115: Darstellung der unterschiedlichen Materialstärken der Hakenklingen aus den Werkstoffen a) 75Cr1 (1.2003) mit einer konstanten Materialstärke und b) X153CrMoV12 (1.2379) mit einer Verringerung der Materialstärke vom Erl zur Hake.

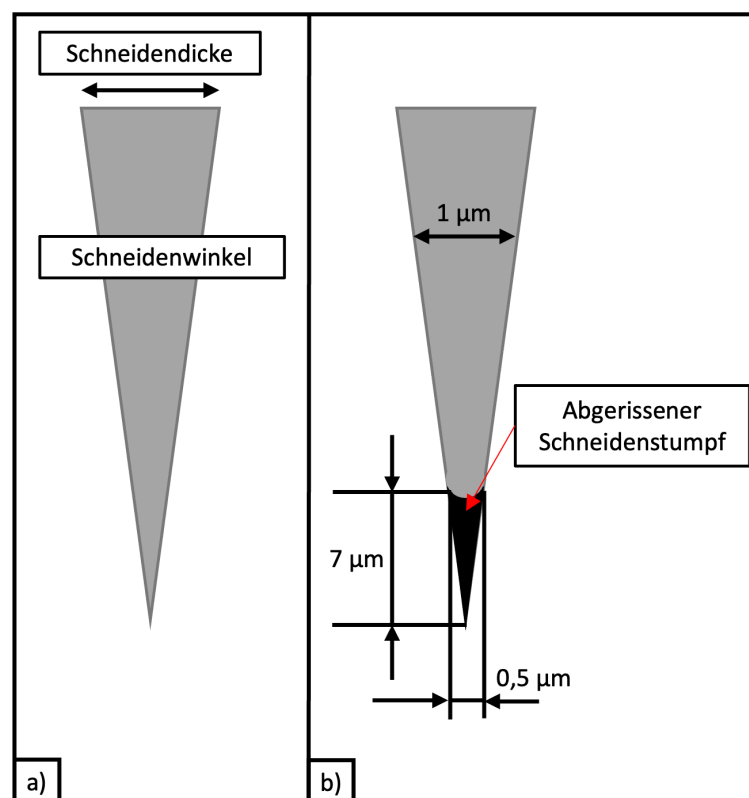


Abbildung 116: Darstellung a) der Schneidengeometrie und b) des Abreißen der Schneidenspitze verursacht durch den Abzug-Prozess in Anlehnung an [248].

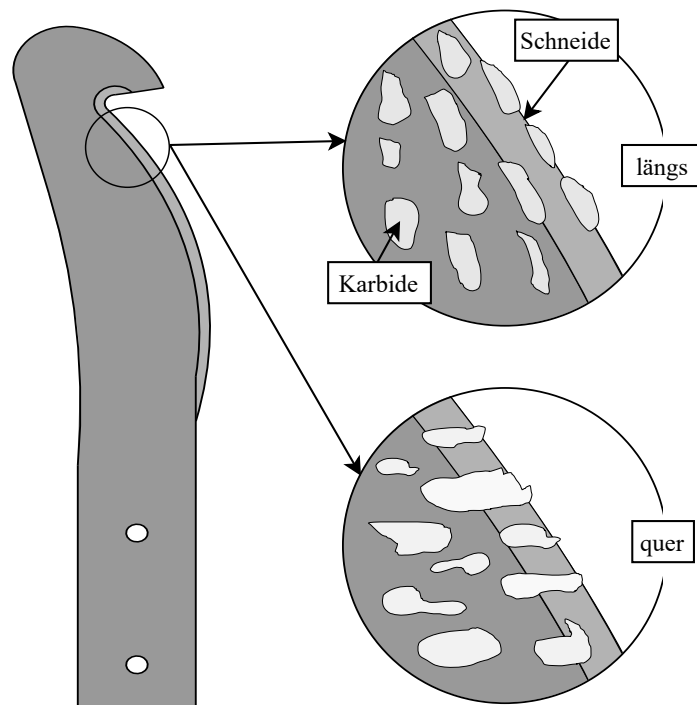


Abbildung 117: Darstellung des Ausbrechens der Karbide an der Schneide der Hakenklinge in Abhängigkeit der Karbidzeiligkeit.

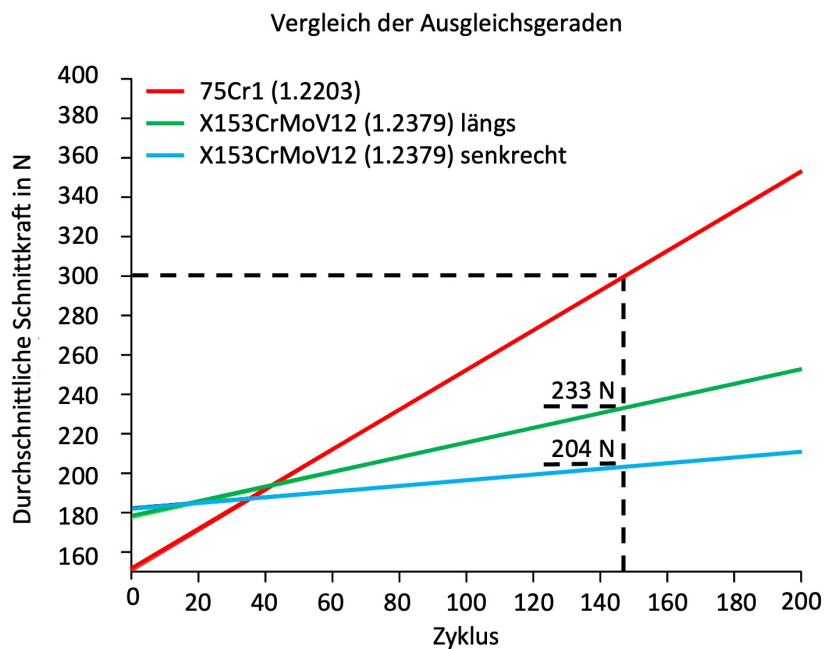


Abbildung 118: Vergleich der Ausgleichsgeraden der einzelnen Schneidzeuge. Die blaue Gerade entspricht der ermittelten Ausgleichsgerade für die konventionelle Hakenklinge aus dem Stahl 75Cr1 (1.2203). Die rote Gerade für die Repurpose-Hakenklinge aus dem Stahl X153CrMoV12 (1.2379) mit der Karbidzeiligkeit parallel. Die grüne Gerade für die Repurpose-Hakenklinge aus dem Stahl X153CrMoV12 (1.2379) senkrecht zur Karbidzeiligkeit.

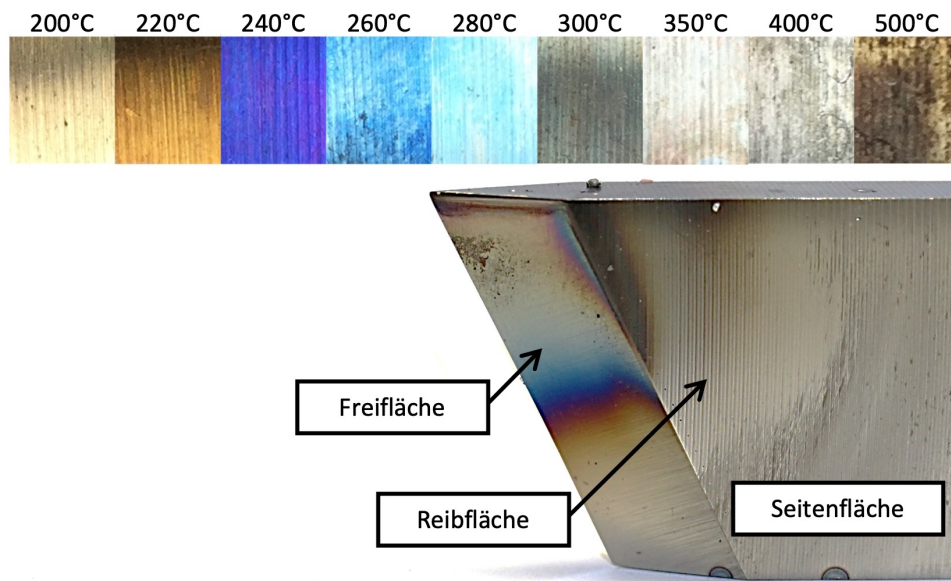


Abbildung 119: Es sind die Färbungen der neun Proben zur Erstellung des Anlassschaubildes sowie die ebenfalls verfarbte linke Seite des benutzten Standard-Drehselmeißels aus dem Stahl 80CrV2 (1.2235) abgebildet. An der Seitenfläche und im oberen Bereich der Freifläche sind keine Anlassfarben zu sehen.

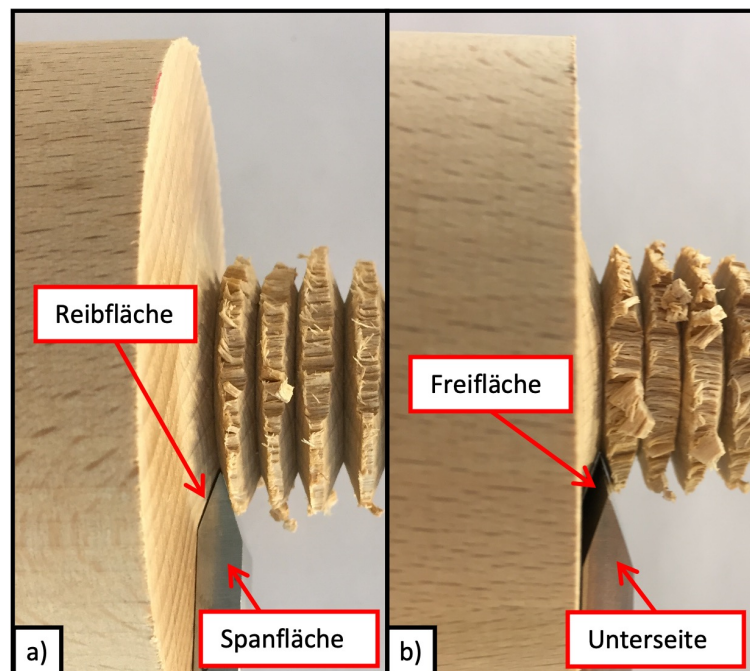


Abbildung 120: Zu sehen ist, wie die Drehselmeißelspitze in das Holz einsticht. a) Sicht von oben auf die Spanfläche des Werkzeugs, b) Sicht auf die Unterseite des Werkzeugs.

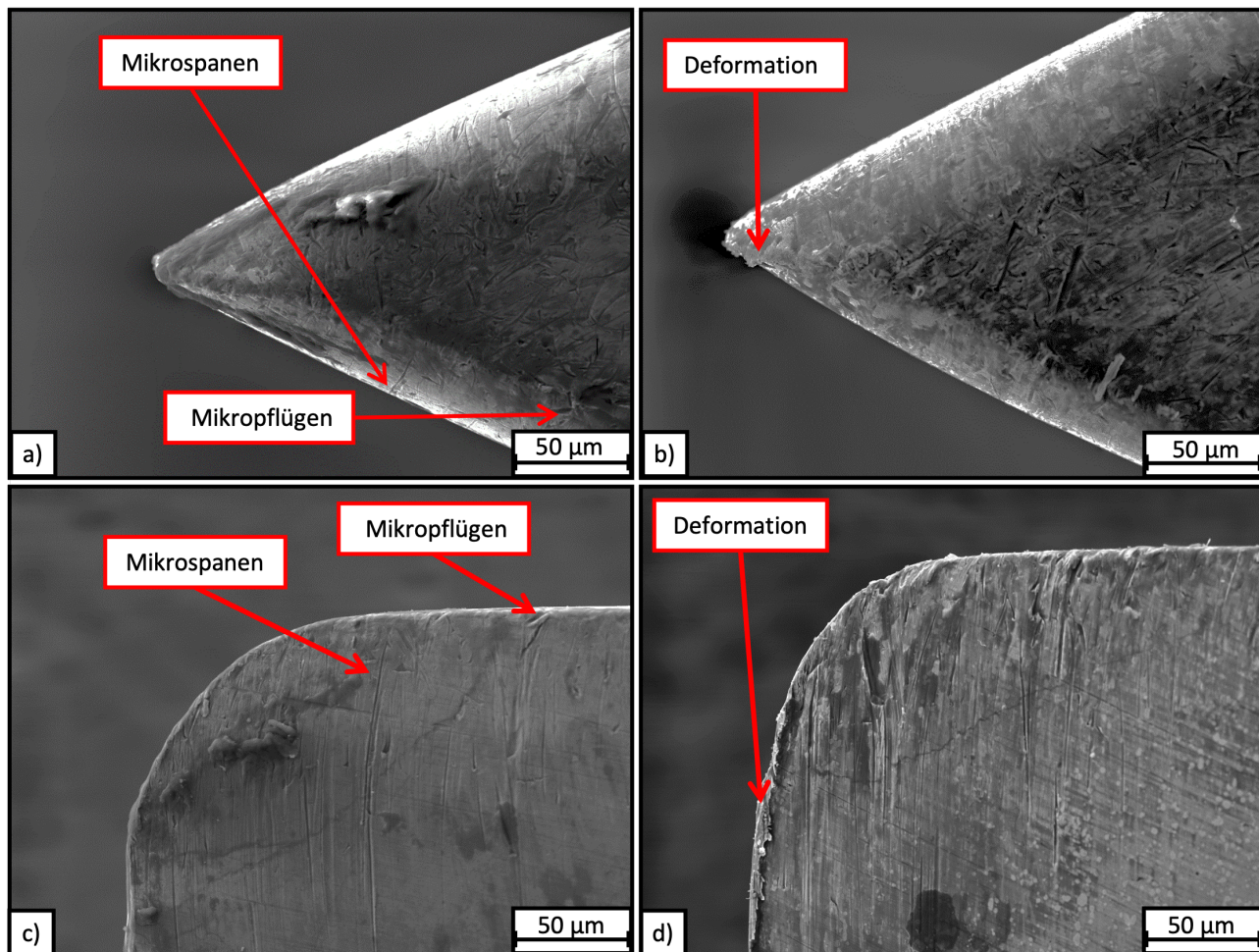


Abbildung 121: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der konventionellen Drechselmeißelspitzen aus den Materialien 80CrV2 (1.2235) und HS6-5-2C (1.3343) mit 1000-facher Vergrößerung nachden Verschleißversuchen. a) Draufsicht 80CrV2, b) Draufsicht HS6-5-2C, c) Seitenansicht 80CrV2, d) Seitenansicht HS6-5-2C

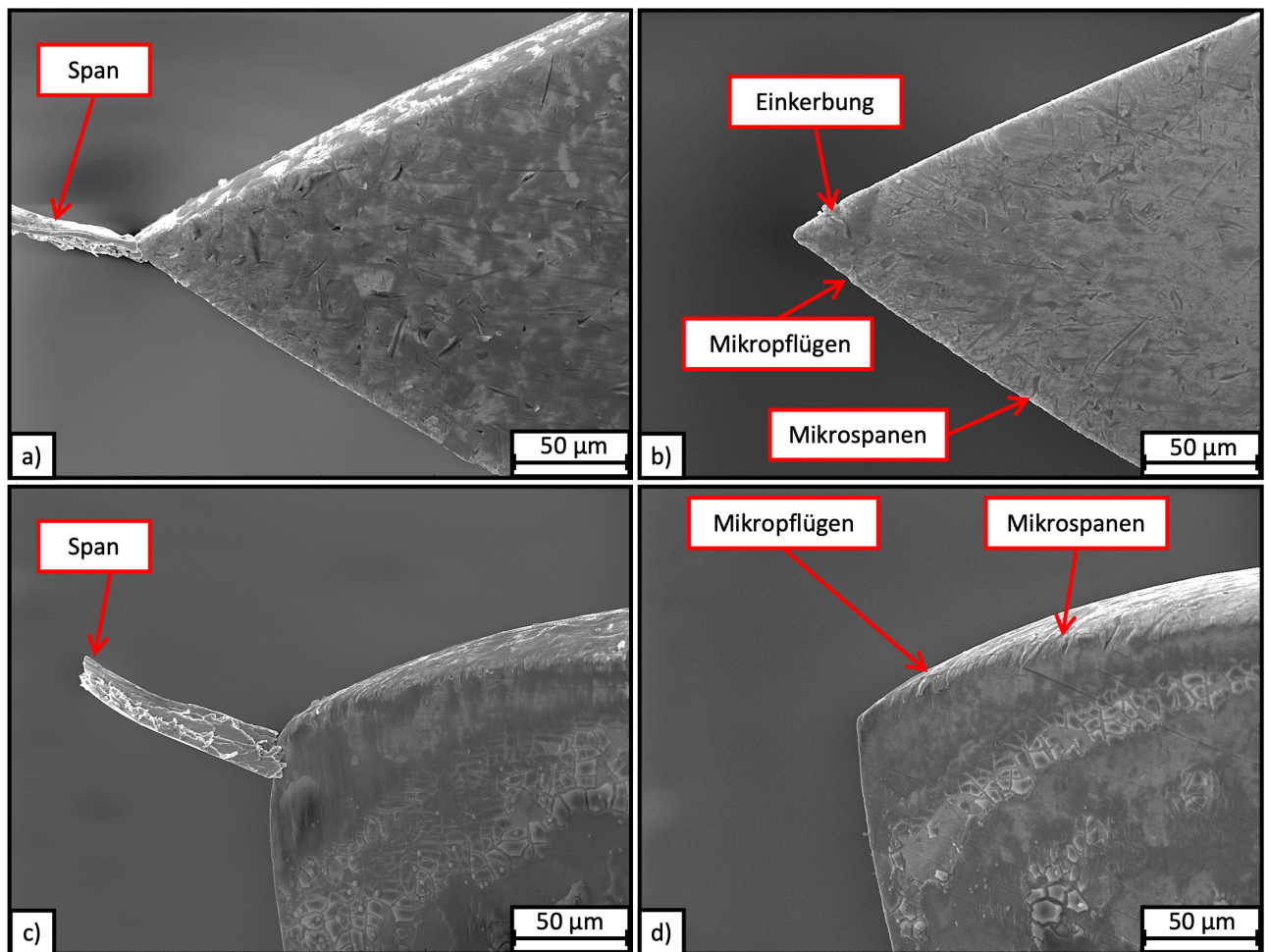


Abbildung 122: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Werkzeuge aus dem Materials X155CrMoV12 (1.2379) mit den Karbidausrichtungen quer und längs mit 1000-facher Vergrößerung. a) Draufsicht quer, b) Draufsicht längs, c) Seitenansicht quer, d) Seitenansicht längs

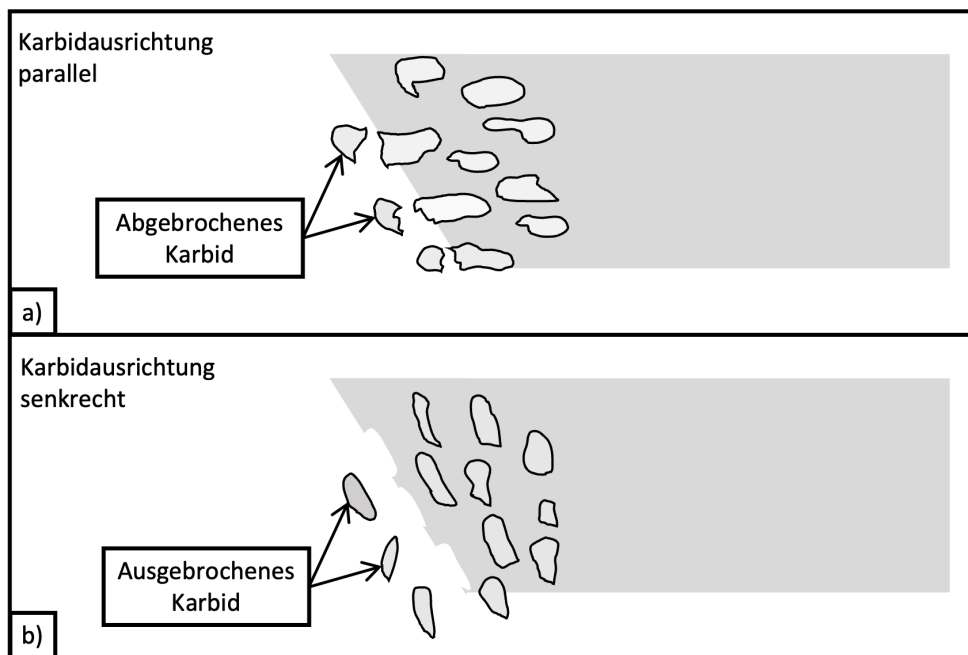


Abbildung 123: Schematische Darstellung der Karbide an der Spitze der Repurpose-Drehseimeiße aus X153CrMoV12 (1.2379) in Abhängigkeit der Karbidzeiligkeit. a) Karbidzeiligkeit parallel im Drehseimeiße, demnach quer zur Schneide. Erkennbar sind die abgebrochenen Karbide an der Spitze. b) Karbidzeiligkeit senkrecht im Drehseimeiße, demnach entlang der Schneide. Die Karbide brechen komplett aus der Schneide aus.

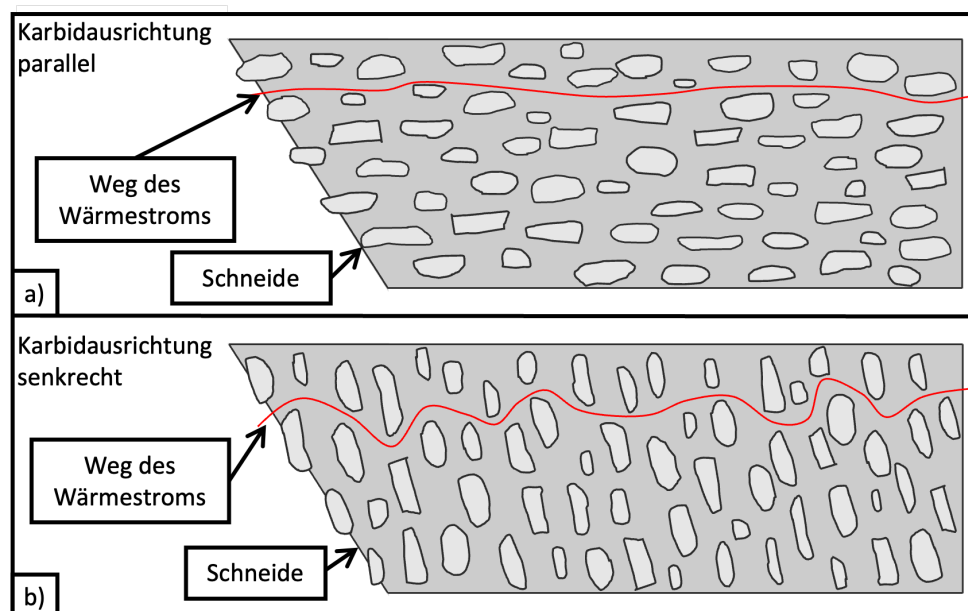


Abbildung 124: Schematische Darstellung der Repurpose-Werkzeuge mit den Karbidausrichtungen a) parallel und b) senkrecht. Eingezeichnet ist der unterschiedliche Weg des Wärmestroms durch die Karbidzeiligkeit von der Spitze durch den Drehseimeiße.

Literaturverzeichnis

- [1] GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, Hrsg.: *Earth Overshoot Day*, 23.3.2020 (siehe S. 1)
- [2] KRAUSMANN, F. u. a.: „Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use“, in: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114 (8) (2017), S. 1880–1885 (siehe S. 1)
- [3] BRUNNER, P. H. und RECHBERGER, H.: „Anthropogenic metabolism and environmental legacies“, in: *Encyclopedia of Global Environmental Change*. Wiley, New York (2002) (siehe S. 1)
- [4] DESING, H., BRAUN, G. und HISCHIER, R.: „Ecological resource availability: a method to estimate resource budgets for a sustainable economy“, in: *Global Sustainability* 3 (2020) (siehe S. 1)
- [5] STEFFEN, W. u. a.: „Sustainability. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet“, in: *Science (New York, N.Y.)* 347 (6223) (2015), S. 1259855 (siehe S. 1)
- [6] UMWELT BUNDESAMT, Hrsg.: *Earth Overshoot Day 2019: Ressourcenbudget verbraucht*, 2019 (siehe S. 1)
- [7] UMWELT BUNDESAMT, Hrsg.: *Ressourcenschonung in der Umweltpolitik*, 2017 (siehe S. 1)
- [8] SCHLEUSSNER, C.-F. u. a.: „Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal“, in: *Nature Climate Change* 6 (9) (2016), S. 827–835 (siehe S. 1)
- [9] FALKNER, R.: „The Paris Agreement and the new logic of international climate politics“, in: *International Affairs* 92 (5) (2016), S. 1107–1125 (siehe S. 1)
- [10] DESING, H. u. a.: „A circular economy within the planetary boundaries: Towards a resource-based, systemic approach“, in: *Resources, Conservation and Recycling* 155 (2020), S. 104673 (siehe S. 1)
- [11] ELIA, V., GNONI, M. G. und TORNESE, F.: „Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis“, in: *Journal of Cleaner Production* 142 (2017), S. 2741–2751 (siehe S. 1)

- [12] KIRCHHERR, J., REIKE, D. und HEKKERT, M.: „Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions“, in: *Resources, Conservation and Recycling* 127 (2017), S. 221–232 (siehe S. 1, 2)
- [13] JOSÉ POTTING, MARKO HEKKERT, ERNST WORRELL, ALDERT HANEMAAIJER: *Circular economy: Measuring innovation in the product chain* (siehe S. 1, 2, 5–7, 82, 83, 85, 95, 96, 101, 104, 126, 129, 157)
- [14] HOLLANDER, M. C. DEN, BAKKER, C. A. und HULTINK, E. J.: „Product Design in a Circular Economy: Development of a Typology of Key Concepts and Terms“, in: *Journal of Industrial Ecology* 21 (3) (2017), S. 517–525 (siehe S. 1)
- [15] WORLD STEEL ASSOCIATION u. a.: „2020 World Steel in Figures“, in: *Brussels*. <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f7982217-cfde-4fdc-8ba0-795ed807f513/World%2520Steel%2520in%2520Figures%25202020i.pdf> (2020) (siehe S. 2)
- [16] HERTWICH, E. u. a.: *Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future*, 2019 (siehe S. 2, 129)
- [17] RITCHIE, H., ROSER, M. und ROSADO, P.: „CO₂ and greenhouse gas emissions“, in: *Our world in data* (2020) (siehe S. 2)
- [18] BUNDESAMT, S.: „Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen“, in: *Statistisches Bundesamt, Berlin* (2020) (siehe S. 2)
- [19] AYRES, R. U.: „The second law, the fourth law, recycling and limits to growth“, in: *Ecological Economics* 29 (3) (1999), S. 473–483 (siehe S. 2)
- [20] BUNGE, R.: „Recovery of metals from waste incinerator bottom ash“, in: *Removal, Treatment and Utilisation of Waste Incineration Bottom Ash; Holm, O., Thome-Kozmiensky, E., Eds* (2015), S. 63–143 (siehe S. 2)
- [21] VAN SCHAIK, A. und REUTER, M. A.: „Recycling indices visualizing the performance of the circular economy“, in: *World Metall. Erzmetall* 69 (4) (2016) (siehe S. 2)
- [22] HARVEY, L. D.: „Iron and steel recycling: Review, conceptual model, irreducible mining requirements, and energy implications“, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 138 (2021), S. 110553 (siehe S. 2)
- [23] DAEHN, K. E., CABRERA SERRENHO, A. und ALLWOOD, J. M.: „How Will Copper Contamination Constrain Future Global Steel Recycling?“, in: *Environmental science & technology* 51 (11) (2017), S. 6599–6606 (siehe S. 2)
- [24] HELBIG, C., THORENZ, A. und TUMA, A.: „Quantitative assessment of dissipative losses of 18 metals“, in: *Resources, Conservation and Recycling* 153 (2020), S. 104537 (siehe S. 2)

- [25] OECD: *Global Material Resources Outlook to 2060 Economic Drivers and Environmental Consequences*, OECD publishing, 2019 (siehe S. 2)
- [26] HAUSCHILD, M. Z., JESWIET, J. und ALTING, L.: „Design for Environment — Do We Get the Focus Right?“, in: *CIRP Annals* 53 (1) (2004), S. 1–4 (siehe S. 2)
- [27] MENKHOFF, L. und ZEEVAERT, M.: *Deutschland kann seine Versorgungssicherheit bei mineralischen Rohstoffimporten erhöhen*, 2022 (siehe S. 2)
- [28] McDOWALL, W. u. a.: „Circular Economy Policies in China and Europe“, in: *Journal of Industrial Ecology* 21 (3) (2017), S. 651–661 (siehe S. 2)
- [29] MONT, O. u. a.: „Business model innovation for a Circular Economy: Drivers and barriers for the Swedish industry—the voice of REES companies“, in: (2017) (siehe S. 2)
- [30] ALLWOOD, J. M. u. a.: „Material efficiency: A white paper“, in: *Resources, Conservation and Recycling* 55 (3) (2011), S. 362–381 (siehe S. 3, 5, 125)
- [31] *Einführung in die Kreislaufwirtschaft: Planung - Recht - Verfahren*, 5. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017 (siehe S. 5, 8)
- [32] FOGARASSY, C. und FINGER, D.: *Theoretical and Practical Approaches of Circular Economy for Business Models and Technological Solutions* (siehe S. 5, 97, 100)
- [33] WILTS, H., Hrsg.: *Deutschland auf dem Weg in die Kreislaufwirtschaft?*, Bd. 15/2016, WISO direkt, Bonn: Friedrich Ebert Stiftung, 2016 (siehe S. 5, 95)
- [34] RUDOLPH, C.: „Geschäftsmodell Circular Economy: Gegenwart und Zukunft der (erweiterten) Kreislaufwirtschaft“, in: *CSR und Geschäftsmodelle*, hrsg. von BUNGARD, P., Management-Reihe Corporate Social Responsibility, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 123–137 (siehe S. 5)
- [35] ANSARI, S. und KROP, P.: „Incumbent performance in the face of a radical innovation: Towards a framework for incumbent challenger dynamics“, in: *Research Policy* 41 (8) (2012), S. 1357–1374 (siehe S. 6)
- [36] MAGNO, F.: „Utilitarian and altruistic motivations in using car sharing: The moderating role of perceived power“, in: *Journal of Cleaner Production* 317 (2021), S. 128409 (siehe S. 6, 129)
- [37] LEHTOKUNNAS, T. u. a.: „Towards a circular economy in food consumption: Food waste reduction practices as ethical work“, in: *Journal of Consumer Culture* 22 (1) (2022), S. 227–245 (siehe S. 6)
- [38] TECCHIO, P., ARDENTE, F. und MATHIEUX, F.: „Understanding lifetimes and failure modes of defective washing machines and dishwashers“, in: *Journal of Cleaner Production* 215 (2019), S. 1112–1122 (siehe S. 7)

- [39] ESMAEILIAN, B. u. a.: „Marketing strategies for refurbished products: Survey-based insights for probabilistic selling and technology level“, in: *Resources, Conservation and Recycling* 167 (2021), S. 105401 (siehe S. 7)
- [40] HAGEDORN, W. u. a.: „More than recycling – The potential of the circular economy shown by a case study of the metal working industry“, in: *Journal of Cleaner Production* 377 (2022), S. 134439 (siehe S. 7, 81, 82, 92, 106, 126, 129)
- [41] PAULINA GOLINSKA-DAWSON und ARKADIUSZ KAWA: „Remanufacturing in automotive industry: Challenges and limitations“, in: *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)* 4 (3) (2011), S. 453–466 (siehe S. 7)
- [42] LEAHY, P. G.: „End-of-life options for composite material wind turbine blades: Recover, repurpose or reuse“, in: *Proceedings of the 14th SWEDES Conference, Dubrovnik, Croatia, 2019*, S. 1–6 (siehe S. 7)
- [43] HEGEMANN, K.-R. und GUDER, R.: „Stahl-Recycling“, in: *Stahlerzeugung*, hrsg. von HEGEMANN, K.-R. und GUDER, R., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, S. 97–106 (siehe S. 8)
- [44] BUJAK, J. W.: „Thermal utilization (treatment) of plastic waste“, in: *Energy* 90 (2015), S. 1468–1477 (siehe S. 8)
- [45] BERNS, H. und THEISEN, W.: *Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen*, 4., bearb. Aufl., Berlin: Springer, 2008 (siehe S. 8, 9, 11, 26, 30, 83, 84, 108, 112, 115–117, 119, 120, 161)
- [46] BAGEL SCHULZE: *Werkstoffkunde: Jetzt mit Aufgaben und Lösungen*, 11., bearb. Aufl., Springer-Lehrbuch, Berlin: Springer Vieweg, 2012 (siehe S. 8–10)
- [47] KLOCKE, F.: *Fertigungsverfahren 2: Zerspanung mit geometrisch unbestimmter Schneide*, 6. Auflage, VDI-Buch, Berlin: Springer Vieweg, 2018 (siehe S. 8, 9, 11)
- [48] KULMBURG ALFRED: „Das Gefüge der Werkzeugstähle - Ein Überblick für den Praktiker. Teil 1: Einteilung, Systematik und Wärmebehandlung der Werkzeugstähle“, in: *Prakt. Metallogr.*, Bd. 35 (siehe S. 9)
- [49] DIN EN ISO 4957:2018-11, *Werkzeugstähle (ISO 4957:2018)*; Deutsche Fassung EN ISO 4957:2018, Berlin (siehe S. 9, 52, 144)
- [50] H. BERNS: „Kaltarbeitsstähle für Schneidwerkzeuge“, in: *Werkstoffkunde der gebräuchlichen Stähle* (1977), S. 205–213 (siehe S. 9, 10)
- [51] MESQUITA, R. A., MICHAEL, K. und SCHNEIDER, R.: *Tool steels: Properties and performance*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2017 (siehe S. 9–12, 28, 83, 117–119)

- [52] HEINRICH, E.: *Die Werkzeugstähle: Unlegierte u. legierte Werkzeugstähle, ihre Zusammensetzung, Eigenschaften, Herstellung u. Behandlung, mit e. Anh. über Schneidmetalle*, 2., völlig neugestaltete Aufl., (6. - 11. Tsd.), Bd. H. 50, Werkstattbücher für Betriebsfachleute, Konstrukteure und Studierende, Berlin, Göttingen und Heidelberg: Springer, 1964 (siehe S. 9)
- [53] H. BERNIS, W. T.: *Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008 (siehe S. 9, 10)
- [54] TARASOV, L. P.: „The microhardness of carbides in tool steels“, in: *Metal progress* 53 (1948), S. 846 (siehe S. 10)
- [55] *Stahlwissen* (siehe S. 10)
- [56] YAMAMOTO, K. u. a.: „Influence of Mo and W on High Temperature Hardness of M_{7C_3} Carbide in High Chromium White Cast Iron“, in: *MATERIALS TRANSACTIONS* 55 (4) (2014), S. 684–689 (siehe S. 10, 108, 119)
- [57] BARGEL, H.-J. und SCHULZE, G.: *Werkstoffkunde*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012 (siehe S. 10, 11, 117)
- [58] KRONENBERG, P. u. a.: „Quantification of methods used in field metallography using the example of quality assurance measures for a circular economy for high-alloy steels“, in: *Practical Metallography* 59 (6) (2022), S. 296–316 (siehe S. 11, 29, 109, 119, 131)
- [59] SCHNEIDER, R. u. a.: „The performance of spray-formed tool steels in comparison to conventional route material“, in: *The Use of Tool Steels: Experience and research 2* (2002), S. 943–959 (siehe S. 11)
- [60] MENDANHA, A., GOLDENSTEIN, H. und PINEDO, C. E.: „Tenacidade do aço ferramenta para trabalho a frio AISI D2–parte I: Influência da microestrutura de partida“, in: *Encontro de Integrantes da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes* (2003), S. 29–30 (siehe S. 11)
- [61] WIECZOREK, L. u. a.: „Supersolidus Liquid Phase Sintering and Heat Treatment on Atomic Diffusion Additive Manufacturing Produced Ledeburitic Cold Work Tool Steel*“, in: *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 77 (4) (2022), S. 269–283 (siehe S. 11, 29)
- [62] BARKALOW, R. H., KRAFT, R. W. und GOLDSTEIN, J. I.: „Solidification of M2 high speed steel“, in: *Metallurgical and Materials Transactions B* 3 (4) (1972), S. 919–926 (siehe S. 12)
- [63] BOCCALINI, M. und GOLDENSTEIN, H.: „Solidification of high speed steels“, in: *International Materials Reviews* 46 (2) (2001), S. 92–115 (siehe S. 12)
- [64] DISCH, N. u. a.: „Influence of Heat Treatment Parameters on the Carbide Morphology of PM High-Speed Steel HS 6-5-3-8“, in: *steel research international* (Dez. 2022) (siehe S. 12)

- [65] MIZUNO, H., SUDOH, K. und YANAGISAWA, T.: „The influence of alloying elements on the morphology of MC primary carbide precipitation in Mo-type high speed tool steel“, in: *DENKI-SEIKO/ELECTRIC FURNACE STEEL* 55 (4) (1984), S. 225–236 (siehe S. 12)
- [66] BENNELL, J. A. und OLIVEIRA, J. F.: „A tutorial in irregular shape packing problems“, in: *Journal of the Operational Research Society* 60 (sup1) (2009), S93–S105 (siehe S. 12, 14)
- [67] ROCHA, P.: *Robust NFP generation for Nesting problems* (siehe S. 12, 14)
- [68] WÄSCHER, G., HAUSSNER, H. und SCHUMANN, H.: „An improved typology of cutting and packing problems“, in: *European Journal of Operational Research* 183 (3) (2007), S. 1109–1130 (siehe S. 12–15, 96)
- [69] KENDALL, G.: „Applying meta-heuristic algorithms to the nesting problem utilising the no fit polygon“, Diss., University of Nottingham, 2000 (siehe S. 12)
- [70] SCHEITHAUER, G.: *Introduction to Cutting and Packing Optimization: Problems, Modeling Approaches, Solution Methods*, 1st edition 2018, International Series in Operations Research & Management Science, Cham: Springer International Publishing, 2018 (siehe S. 12, 13)
- [71] LICARI, R. und LO VALVO, E.: „Optimal positioning of irregular shapes in stamping die strip“, in: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 52 (5-8) (2011), S. 497–505 (siehe S. 12)
- [72] MARTELLO, S., MONACI, M. und VIGO, D.: „An Exact Approach to the Strip-Packing Problem“, in: *INFORMS Journal on Computing* 15 (3) (2003), S. 310–319 (siehe S. 12)
- [73] NYE, T. J.: „Optimal nesting of irregular convex blanks in strips via an exact algorithm“, in: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41 (7) (2001), S. 991–1002 (siehe S. 12)
- [74] FOWLER, R. J., PATERSON, M. S. und TANIMOTO, S. L.: „Optimal packing and covering in the plane are NP-complete“, in: *Information Processing Letters* 12 (3) (1981), S. 133–137 (siehe S. 12)
- [75] EGEBLAD, J., NIELSEN, B. K. und ODGAARD, A.: „Fast neighborhood search for two- and three-dimensional nesting problems“, in: *European Journal of Operational Research* 183 (3) (2007), S. 1249–1266 (siehe S. 13)
- [76] CHERRI, L. H. u. a.: „Optimality in nesting problems: New constraint programming models and a new global constraint for non-overlap“, in: *Operations Research Perspectives* 6 (2019), S. 100125 (siehe S. 13, 14, 96, 158)

- [77] GOESSENS, W.: „On an Algorithm for Some Packing-Problem“, in: *DGOR / ÖGOR*, hrsg. von HANSMANN, K.-W. u. a., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1993, S. 251–258 (siehe S. 13)
- [78] JOHNSON, D. S. u. a.: „Worst-Case Performance Bounds for Simple One-Dimensional Packing Algorithms“, in: *SIAM Journal on Computing* 3 (4) (1974), S. 299–325 (siehe S. 13)
- [79] MARTELLO, S. und TOTH, P.: *Knapsack problems: Algorithms and computer implementations*, Book on demand, Wiley-Interscience series in discrete mathematics and optimization, Ann Arbor, Mich.: UMI Books on Demand, 2006 (siehe S. 13)
- [80] HEICKEN, K. und KÖNIG, W.: „Integration eines heuristisch-optimierenden Verfahrens zur Lösung eines eindimensionalen Verschnittproblems in einem EDV-gestützten Produktionsplanungs- und-Steuerungssystem“, in: *Operations-Research-Spektrum* 1 (4) (1980), S. 251–259 (siehe S. 13)
- [81] BENNELL, J. A. und OLIVEIRA, J. F.: „The geometry of nesting problems: A tutorial“, in: *European Journal of Operational Research* 184 (2) (2008), S. 397–415 (siehe S. 14)
- [82] DALALAH, D., KHRAIS, S. und BATAINEH, K.: „Waste minimization in irregular stock cutting“, in: *Journal of Manufacturing Systems* 33 (1) (2014), S. 27–40 (siehe S. 14)
- [83] STRUCKMEIER, F.: *Prozesssicherheit von Laserschneidmaschinen: Auflagemessung und Schachtelung*, 2021 (siehe S. 14)
- [84] TATSUNORI HIMENO, K. N.: „Nesting data generation device and nesting data generation method“, Pat. US9031688B2 (siehe S. 14)
- [85] DEWIL, R., VANSTEENWEGEN, P. und CATTRYSE, D.: „Sheet Metal Laser Cutting Tool Path Generation: Dealing with Overlooked Problem Aspects“, in: *Key Engineering Materials* 639 (2015), S. 517–524 (siehe S. 14)
- [86] STRUCKMEIER, F. und LEÓN, F. P.: „Nesting in the sheet metal industry: dealing with constraints of flatbed laser-cutting machines“, in: *Procedia Manufacturing* 29 (2019), S. 575–582 (siehe S. 14)
- [87] HERRMANN, J. W. und DELALIO, D. R.: „Algorithms for sheet metal nesting“, in: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 17 (2) (2001), S. 183–190 (siehe S. 14, 98)
- [88] TANG, C. H. und RAJESHAM, S.: „Computer aided nesting in sheet metal for pressworking operations involving bending“, in: *Journal of Materials Processing Technology* 44 (3-4) (1994), S. 319–326 (siehe S. 15, 98)
- [89] BALDACCI, R. u. a.: „Algorithms for nesting with defects“, in: *Discrete Applied Mathematics* 163 (2014), S. 17–33 (siehe S. 15, 98)

- [90] LUO, X. u. a.: „Distribution Vehicle Routing Optimization Based on 3D Loading“, in: *Advances in Smart Vehicular Technology, Transportation, Communication and Applications*, hrsg. von WU, T.-Y. u. a., Bd. 250, Smart Innovation, Systems and Technologies, Singapore: Springer Singapore, 2022, S. 87–97 (siehe S. 15)
- [91] DALL’AGNOL, G., SAGAWA, J. K. und TAVARES NETO, R. F.: „Scheduling for Additive Manufacturing: a literature review“, in: *Gestão & Produção* 29 (2022) (siehe S. 15)
- [92] DURAKOVIC, B.: „Design for additive manufacturing: Benefits, trends and challenges“, in: *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)* 6 (2) (2018), S. 179 (siehe S. 16)
- [93] LUTTERS, E., DAM, D. TEN und FANEKER, T.: „3D Nesting of Complex Shapes“, in: *Procedia CIRP* 3 (2012), S. 26–31 (siehe S. 16)
- [94] *DIN 8580:2003-09, Fertigungsverfahren_- Begriffe, Einteilung*, Berlin (siehe S. 16–20)
- [95] WESTKÄMPER, E. und WARNECKE, H. J.: *Einführung in die Fertigungstechnik*, 8., aktualisierte und erweiterte Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2010 (siehe S. 16, 17, 86)
- [96] *DIN 8588:2013-08, Fertigungsverfahren Zerteilen_- Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 16)
- [97] SPUR, G., STÖFERLE, T. und SCHMOECKEL, D.: *Handbuch der Fertigungstechnik*, München: Carl Hanser, 1985 (siehe S. 16)
- [98] FRITZ, H. und SCHULZE, G., Hrsg.: *Fertigungstechnik*, 11., neu bearb. u. erg. Aufl. 2015, Springer-Lehrbuch, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015 (siehe S. 16, 17, 19, 20)
- [99] *DIN 8589-0:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_- Teil_0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 17)
- [100] *DIN 8589-1:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_- Teil_1: Drehen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 17)
- [101] *DIN 8589-2:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_- Teil_2: Bohren, Senken, Reiben; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 17)
- [102] *DIN 8589-3:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_- Teil_3: Fräsen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 17)
- [103] *DIN 8589-4:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_- Teil_4: Hobeln, Stoßen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 17)

- [104] *DIN 8589-5:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_- Teil_5: Räumen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 17)
- [105] *DIN 8589-6:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_- Teil_6: Sägen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 17)
- [106] *DIN 8589-7:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_- Teil_7: Feilen, Raspeln; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 17)
- [107] *DIN 8589-8:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_- Teil_8: Bürstspanen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 17)
- [108] *DIN 8589-9:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_- Teil_9: Schaben, Meißeln; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 17)
- [109] *DIN 8589-11:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_- Teil_11: Schleifen mit rotierendem Werkzeug; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 17)
- [110] *DIN 8589-12:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_- Teil_12: Bandschleifen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 17)
- [111] *DIN 8589-13:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_- Teil_13: Hubschleifen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 17)
- [112] *DIN 8589-14:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_- Teil_14: Honen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 17)
- [113] *DIN 8589-15:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_- Teil_15: Läppen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 17)
- [114] *DIN 8589-17:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen_- Teil_17: Gleitspanen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 17)
- [115] KÖNIG, W. und KLOCKE, F.: „Materialbearbeitung mit Hochdruckwasserstrahl“, in: *Fertigungsverfahren 3: Abtragen und Generieren*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997, S. 219–229 (siehe S. 18)
- [116] DONG, Y. u. a.: „On-line Recycling of Abrasives in Abrasive Water Jet Cleaning“, in: *Procedia CIRP* 15 (2014), S. 278–282 (siehe S. 18)
- [117] *VDI 2906 Blatt 10* (siehe S. 18)
- [118] S. ALSOUFI, M.: „State-of-the-Art in Abrasive Water Jet Cutting Technology and the Promise for Micro- and Nano-Machining“, in: *International Journal of Mechanical Engineering and Applications* 5 (1) (2017), S. 1 (siehe S. 18)

- [119] SARAVANAN, S. u. a.: „A review on recent progresses in machining methods based on abrasive water jet machining“, in: *Materials Today: Proceedings* 21 (2020), S. 116–122 (siehe S. 18, 87)
- [120] DIN 8590:2003-09, *Fertigungsverfahren Abtragen.- Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 18)
- [121] DIN EN ISO 9013:2017-05, *Thermisches Schneiden.- Einteilung thermischer Schnitte.- Geometrische Produktspezifikation und Qualität (ISO_9013:2017); Deutsche Fassung EN_ISO_9013:2017*, Berlin (siehe S. 19)
- [122] VDI 2906 Blatt 8 *Laserstrahlschneiden* (siehe S. 19, 20)
- [123] GRAF, T.: *Laser: Grundlagen der Laserstrahlerzeugung*, 2., überarb. und erw. Aufl., Lehrbuch, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015 (siehe S. 19)
- [124] *Fertigungsverfahren 3*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007 (siehe S. 19)
- [125] BLIEDTNER, M.: *LASERMATERIALBEARBEITUNG*, [Place of publication not identified]: CARL HANSER Verlag GMBH &, 2013 (siehe S. 19)
- [126] DOHLUS, R.: *Lasertechnik*, DE GRUYTER, 2015 (siehe S. 19)
- [127] TRÄGER, F., Hrsg.: *Springer handbook of lasers and optics*, Dordrecht: Springer, 2012 (siehe S. 19)
- [128] OHLSSON, L. u. a.: „Comparison between Abrasive Water Jet Cutting and Laser Cutting“, in: *Journal of Laser Applications* 3 (3) (1991), S. 46–50 (siehe S. 19, 90)
- [129] HÜGEL, H. und GRAF, T.: *Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren*, 2., neu bearb. Aufl., Studium, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009 (siehe S. 19, 20)
- [130] DIN 32516:2022-09 (siehe S. 19)
- [131] BOUJELBENE, M. u. a.: „Effects of the laser cutting parameters on the micro-hardness and on the heat affected zone of the mi-hardened steel“, in: *International Journal of Advanced and Applied Sciences* 4 (5) (2017), S. 19–25 (siehe S. 20)
- [132] GVOZDEV, A. E. u. a.: „Multiparametric optimization of laser cutting of steel sheets“, in: *Inorganic Materials: Applied Research* 6 (4) (2015), S. 305–310 (siehe S. 20)
- [133] SERGEEV, N. N. u. a.: „Decarburization and the Influence of Laser Cutting on Steel Structure“, in: *Steel in Translation* 48 (5) (2018), S. 313–319 (siehe S. 20)
- [134] DIN 8591:2003-09, *Fertigungsverfahren Zerlegen.- Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Berlin (siehe S. 20)
- [135] VANEGAS, P. u. a.: „Ease of disassembly of products to support circular economy strategies“, in: *Resources, Conservation and Recycling* 135 (2018), S. 323–334 (siehe S. 21)

- [136] YANG, Q., YU, S. und SEKHARI, A.: „A modular eco-design method for life cycle engineering based on redesign risk control“, in: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 56 (9-12) (2011), S. 1215–1233 (siehe S. 21, 85)
- [137] DUFLOU, J. R. u. a.: „Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study“, in: *CIRP Annals* 57 (2) (2008), S. 583–600 (siehe S. 21, 85)
- [138] MASING, G.: „Eigenspannungen“, in: *Lehrbuch der Allgemeinen Metallkunde*, hrsg. von MASING, G., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1950, S. 400–422 (siehe S. 21)
- [139] SPIESS, L. u. a.: *Moderne Röntgenbeugung*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009 (siehe S. 21, 22)
- [140] HABSCHIED, M. u. a.: „Fertigung und Eigenspannungen*“, in: *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 70 (3) (2015), S. 111–121 (siehe S. 21, 22)
- [141] ZERBST, U. und MADIA, M., Hrsg.: *Bruchmechanische Bauteilbewertung*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022 (siehe S. 21)
- [142] TIETZ, H.-D., BLUMENAUER, H. und HOFFMANN, H.: *Eigenspannungen in Werkstoffen*, DE GRUYTER, 1977 (siehe S. 21)
- [143] WOLFSTIEG, U. und MACHERAUCH, E.: „Ursachen und Bewertung von Eigenspannungen“, in: *Chemie Ingenieur Technik* 45 (11) (1973), S. 760–770 (siehe S. 21, 22)
- [144] EIGENMANN, B. und MACHERAUCH, E.: „Röntgenographische Untersuchung von Spannungszuständen in Werkstoffen. Teil III. Fortsetzung von Matwiss. und Werkstofftechn. Heft 3/1995, S. 148-160 und Heft 4/1995, S. 199-216“, in: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 27 (9) (1996), S. 426–437 (siehe S. 21, 22)
- [145] TIETZ, H.-D: *Grundlagen der Eigenspannungen: Entstehung in Metallen, Hochpolymeren und silikatischen Werkstoffen Meßtechnik und Bewertung*, Wien: Springer Wien, 2013 (siehe S. 22)
- [146] CHANG, W.-T. und CHEN, L.-C.: „Design and experimental evaluation of a circular saw blade with self-clamped cutting inserts“, in: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 83 (1-4) (2016), S. 365–379 (siehe S. 22)
- [147] MÜNZ, U. V.: „Vorspannungszustand und Arbeitsverhalten von Kreissägeblättern“, in: *Holz als Roh- und Werkstoff* 36 (9) (1978), S. 345–352 (siehe S. 22, 23)
- [148] MOTE, C. D. und SZYMANI, R.: „A review report on principal developments in thin circular saw vibration and control research“, in: *Holz als Roh- und Werkstoff* 35 (5) (1977), S. 189–196 (siehe S. 22)
- [149] LI, S. u. a.: „Dynamic stability of cemented carbide circular saw blades for woodcutting“, in: *Journal of Materials Processing Technology* 238 (2016), S. 108–123 (siehe S. 22, 23)

- [150] DUGDALE, D. S.: „Stiffness of a spinning disc clamped at its centre“, in: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 14 (6) (1966), S. 349–356 (siehe S. 22)
- [151] MOTE, C. D. und NIEH, L. T.: „On the foundation of circular-saw stability theory“, in: *Wood and Fiber Science* (1973), S. 160–169 (siehe S. 22)
- [152] BARZ, E.: „Der Spannungszustand von Kreissägeblättern und seine Auswirkung auf das Arbeitsverhalten“, in: *Holz als Roh- und Werkstoff* 20 (10) (1962), S. 393–397 (siehe S. 22)
- [153] SCHAJER, G. S.: „Understanding saw tensioning“, in: *Holz als Roh- und Werkstoff* 42 (11) (1984), S. 425–430 (siehe S. 22, 160)
- [154] BARZ, E.: *Fertigungsverfahren und Spannungsverlauf bei Kreissägeblättern für Holz*, Bd. 360, Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1957 (siehe S. 22, 23)
- [155] BARZ, E.: „Vergleichende Untersuchungen über das Spannen von Kreissägeblättern mit Maschinen und mit Richthämmern“, in: *Holz als Roh- und Werkstoff* 21 (4) (1963), S. 135–144 (siehe S. 23)
- [156] HEISEL, U., STEHLE, T. und GHASSEMI, H.: „Experimental investigation into parameters influencing roll tensioning of circular saw blades“, in: *Journal of Machine Engineering* 15 (2015) (siehe S. 23)
- [157] MÜNZ, U. V.: „Mechanisch und thermisch erzeugte Spannungen in Kreissägeblättern“, in: *Holz als Roh- und Werkstoff* 38 (6) (1980), S. 201–208 (siehe S. 23)
- [158] BARZ, E.: „Zur Frage der Eigenspannungen in scheiben- und bandförmigen Werkzeugen—Erste Mitteilung: Zerstörungsfreie Ermittlung von Eigenspannungen bei scheiben- und bandförmigen Trennwerkzeugen“, in: *Holz als Roh- und Werkstoff* 23 (10) (1965), S. 412–419 (siehe S. 23)
- [159] SCHAJER, G. S. und MOTE, C. D.: „Analysis of optimal roll tensioning for circular saw stability“, in: *Wood and Fiber Science* (1984), S. 323–338 (siehe S. 23)
- [160] AOYAMA, T. u. a.: „Tensioning of band-saw blades by rolls. I. Calculation of crown. II. Calculation of tension“, in: *Journal of the Japan Wood Research Society* 16 (8) (1970), S. 370–381 (siehe S. 23)
- [161] AOYAMA, T. und OHMORI, Y.: „Tensioning of circular saw blade by stretcher, 1: Effect of rolling position“, in: *Journal of the Japan Wood Research Society* (1977) (siehe S. 23)
- [162] AOYAMA, T. und OHMORI, Y.: „Tensioning of circular saw blade by stretcher, 2: Effect of roll pressure“, in: *Journal of the Japan Wood Research Society (Japan)* (1977) (siehe S. 23)
- [163] PAHLITZSCH, G. und FRIEBE, E.: „Über das Vorspannen von Kreissägeblättern“, in: *Holz als Roh- und Werkstoff* 31 (12) (1973), S. 457–463 (siehe S. 23)

- [164] SZYMANI, R. und MOTE, C. D.: „Theoretical and experimental analysis of circular saw tensioning“, in: *Wood Science and Technology* 13 (3) (1979), S. 211–237 (siehe S. 23)
- [165] *GFT Arbeitsblatt 7: GFT Arbeitsblatt 7: Tribologie - Verschleiß, Reibung; Definitionen, Begriffe, Prüfung*, 2002 (siehe S. 23, 24, 26, 113, 115)
- [166] CZICHOS, H. und HABIG, K.-H.: *Tribologie-Handbuch*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020 (siehe S. 23–28, 107, 108, 113, 115, 116, 118)
- [167] WEISSBACH, W.: *Werkstoffkunde: Struktur, Eigenschaften, Prüfung*, 2012 (siehe S. 23, 24)
- [168] *DIN 50320 Verschleiß: Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes*, Dezember.1979 (siehe S. 24)
- [169] BERNDGEN, W.: *Abrasion und Erosion: Grundlagen, betriebl. Erfahrungen, Verminderung*, München und Wien: Hanser, 1986 (siehe S. 24)
- [170] KARL SOMMER, R. H. J. S.: *Verschleiß metallischer Werkstoffe*, Springer Vieweg (siehe S. 24, 26–28)
- [171] ZUM GAHR, K.-H.: *Reibung und verschleiss bei metallischen und nichtmetallischen werkstoffen*, Oberursel, Germany: DGM-Informationsgesellschaft m. b. H, 1986 (siehe S. 24, 161)
- [172] MATTHÄI, G.: „Über den Gleitverschleiß ungeschmierter Oberflächen“, in: *Forschung im Ingenieurwesen* 30 (1) (1964), S. 1–13 (siehe S. 24)
- [173] BÖHMER, H.-J.: „Wälzverschleiß und -ermüdung von Bauteilen und Maßnahmen zu ihrer Einschränkung“, in: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 29 (12) (1998), S. 697–713 (siehe S. 25)
- [174] GLATZEL, W.-D. und BRAUER, H.: „Prallverschleiß“, in: *Chemie Ingenieur Technik* 50 (7) (1978), S. 487–497 (siehe S. 25)
- [175] BLAU, P. J.: *FRICTION SCIENCE AND TECHNOLOGY: From concepts to applications, second edition*, [Place of publication not identified]: CRC Press, 2019 (siehe S. 25)
- [176] ZUM GAHR, K. H.: „Furchungsverschleiß duktiler Metalle“, in: *International Journal of Materials Research* 73 (5) (1982), S. 267–276 (siehe S. 25, 26)
- [177] CORONADO, J. J. und SINATORA, A.: „Effect of abrasive size on wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms: Part 1“, in: *Wear* 271 (9-10) (2011), S. 1794–1803 (siehe S. 25)
- [178] RABINOWICZ, E. und MUTIS, A.: „Effect of abrasive particle size on wear“, in: *Wear* 8 (5) (1965), S. 381–390 (siehe S. 25)

- [179] WELLINGER, K. und UETZ, H.: *Gleitverschleiß, Spülverschleiß, Strahlverschleiß unter der Wirkung von körnigen Stoffen*, Forschung auf d. Geb. d. Ingenieurwesens: Ausg. B, VDI-Verlag, 1955 (siehe S. 26)
- [180] FÖHL, J.: „Möglichkeiten des Verschleißschutzes von Bauteilen gegenüber abrasivem und erosivem Verschleiß“, in: *Reibung und Verschleiß von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen* (Czichos, H., Federführender Autor). Grafenau: Expert-Verlag (1982), S. 86 (siehe S. 26)
- [181] ZUM GAHR, K.-H.: *Microstructure and wear of materials*, Bd. 10, Tribology series, Amsterdam und New York: Elsevier, 2010 (siehe S. 26, 108)
- [182] HOLM, R.: *Electric contacts: theory and application*, Springer Science & Business Media, 2013 (siehe S. 27)
- [183] GEE, A. W. DE: „„Adhäsionsverhalten von Werkstoffen und Maßnahmen zur Verhinderung des „Fressens“ von Bewegungselementen“, in: *Reibung und Verschleiß von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen*“, Grafenau, Expert Verlag (1982), S. 75 (siehe S. 27)
- [184] SORKO, S. R. und WALDHAUSER, W.: *Festkörperreibung*, 2019 (siehe S. 28)
- [185] SCHÖLER, S. u. a.: *Selective oxidation of tool steel surfaces under a protective gas atmosphere using inductive heat treatment* (siehe S. 28)
- [186] BÜRGEL, R., JÜRGEN MAIER, H. und NIENDORF, T.: *Hochtemperaturkorrosion* (siehe S. 28, 113, 116)
- [187] KHRUSCHOV, M. M.: „Principles of abrasive wear“, in: *Wear* 28 (1) (1974), S. 69–88 (siehe S. 28, 108)
- [188] BERNIS, H.: *Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffe*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998 (siehe S. 28, 108)
- [189] BUNGARDT, K., KUNZE, E. und HORN, E.: „Untersuchungen über den Aufbau des Systems Eisen-Chrom-Kohlenstoff“, in: *Archiv für das Eisenhüttenwesen* 29 (3) (1958), S. 193–203 (siehe S. 29)
- [190] DELGADO, M. P.: „Study of the solidification of M2 high-speed steel in different ingots and its effects on the microstructure and final mechanical properties“, in: (2011) (siehe S. 29)
- [191] MESQUITA, R. A. und BARBOSA, C. A.: „High-speed steels produced by conventional casting, spray forming and powder metallurgy“, in: *Materials science forum*, Bd. 498, 2005, S. 244–250 (siehe S. 29)
- [192] HANNOSCHÖCK, N.: *Wärmeleitung und -transport*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018 (siehe S. 30)

- [193] GRIGULL, U. und SANDNER, H.: *Wärmeleitung*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1990 (siehe S. 30)
- [194] HUST, J. G.: „Thermal conductivity and thermal diffusivity“, in: *Materials at low temperatures*, 1983 (siehe S. 30)
- [195] TRITT, T. M.: *Thermal conductivity: Theory, properties, and applications*, Physics of solids and liquids, New York und London: Springer, 2011 (siehe S. 30)
- [196] FRANZ, R. und WIEDEMANN, G.: „Ueber die Wärme-Leitungsfähigkeit der Metalle“, in: *Annalen der Physik und Chemie* 165 (8) (1853), S. 497–531 (siehe S. 30)
- [197] KITTEL, C.: *Einführung in die Festkörperphysik*, 14., überarb. und erw. Aufl., München [u.a.]: Oldenbourg, 2006 (siehe S. 30)
- [198] BÄCKLUND, N. G.: „An experimental investigation of the electrical and thermal conductivity of iron and some dilute iron alloys at temperatures above 100°K“, in: *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 20 (1-2) (1961), S. 1–16 (siehe S. 30)
- [199] LORENZ, L.: „Bestimmung der Wärmegrade in absolutem Maasse“, in: *Annalen der Physik und Chemie* 223 (11) (1872), S. 429–452 (siehe S. 30)
- [200] SIMON KLEIN: „Einfluss der Mikrostruktur auf die Wärmeleitfähigkeit mehrphasiger Stähle“, Doctoralthesis, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsbibliothek, 2018 (siehe S. 30)
- [201] JENS JONAS WILZER: „Wärmeleitfähigkeit martensitisch härtbarer Stähle“, Doctoralthesis, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsbibliothek, 2015 (siehe S. 30)
- [202] MAURER, E.: „Wärmeleitfähigkeit von chromhaltigen Stählen bei hohen Temperaturen“, in: *Archiv für das Eisenhüttenwesen* 10 (4) (1936), S. 145–154 (siehe S. 31, 122)
- [203] ESSER, H., EILENDER, W. und PÜTZ, E.: „Die Wärmeleitfähigkeit von technisch reinem Eisen und verschiedenen Stählen“, in: *Archiv für das Eisenhüttenwesen* 11 (12) (1938), S. 619–622 (siehe S. 31, 122)
- [204] R W POWELL: „Further measurements of the thermal and electrical conductivity of iron at high temperatures“, in: *Proceedings of the Physical Society* 51 (3) (1939), S. 407 (siehe S. 31, 122)
- [205] TERADA, Y. u. a.: „Effects of alloying additions on thermal conductivity of ferritic iron“, in: *ISIJ international* 42 (3) (2002), S. 322–324 (siehe S. 31, 122)
- [206] KOHLHAAS, R. und KIERSPE, W.: „Wärmeleitfähigkeit von reinem Eisen und einigen ferritischen und austenitischen Stählen zwischen der Temperatur der flüssigen Luft und Raumtemperatur“, in: *Archiv für das Eisenhüttenwesen* 36 (4) (1965), S. 301–309 (siehe S. 31, 122)

- [207] BUNGARDT, K. und SPYRA, W.: „Wärmeleitfähigkeit unlegierter und legierter Stähle und Legierungen bei Temperaturen zwischen 20 und 700 C“, in: *Archiv für das Eisenhüttenwesen* 36 (4) (1965), S. 257–267 (siehe S. 31, 122)
- [208] SCHENCK, H., SCHMIDTMANN, E. und BRANDIS, H.: „Einfluß unterschiedlicher Wärmebehandlung auf das Verfestigungsverhalten und den spezifischen elektrischen Widerstand von weichem, unberuhigtem Thomasstahl und aufgekohltem Reineisen bei der Kaltverformung und während der Abschreck-oder Verformungsalterung“, in: *Archiv für das Eisenhüttenwesen* 28 (12) (1957), S. 761–769 (siehe S. 31)
- [209] GELLER, Y. A., MOISEEV, V. F. und KOLTUNOV, A. A.: „Heat conductivity of high-speed cutting steels“, in: *Metal Science and Heat Treatment* 5 (9) (1963), S. 493–497 (siehe S. 31)
- [210] VALLS, I., CASAS, B. und RODRIGUEZ, N.: „Importance of tool material thermal conductivity in the die longevity and product quality in HPDC“, in: *Tool steels—deciding factor in worldwide production* 1 (2009), S. 127–140 (siehe S. 31, 122)
- [211] ISAAC VALLS ANGLES: „Verfahren zur einstellung der wärmeleitfähigkeit eines stahls, werkzeugstahl, insbesondere warmarbeitsstahl, und stahlgegenstand: EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG“, Pat. 11.10.2017 Patentblatt 2017/41 (siehe S. 31)
- [212] MEURISSE, E., ERNST, C. und BLECK, W.: „Improvement of thermal conductivity of hot-work tool steels by alloy design and heat treatment“, in: *TOOL*, 2012, S. 215–224 (siehe S. 31, 122)
- [213] WILZER, J. u. a.: „Temperature-dependent thermal conductivities of non-alloyed and high-alloyed heat-treatable steels in the temperature range between 20 and 500° C“, in: *Journal of Materials Science* 49 (14) (2014), S. 4833–4843 (siehe S. 31, 122)
- [214] GELDER, S. und JESNER, G.: „New high performance hot work tool steel with improved physical properties“, in: *TOOL*, 2012, S. 199–206 (siehe S. 31)
- [215] WILZER, J. u. a.: „The influence of heat treatment and resulting microstructures on the thermophysical properties of martensitic steels“, in: *Journal of Materials Science* 48 (24) (2013), S. 8483–8492 (siehe S. 31)
- [216] ZWEBEN, C.: „Thermal materials solve power electronics challenges“, in: *Power Electronics Technology* 32 (2006), S. 40–47 (siehe S. 31)
- [217] SCHUBERT, T. u. a.: „Kupfer-Verbundwerkstoffe für passive Kühlkörper in der Elektronik“, in: *Metall* 61 (2007), S. 752–756 (siehe S. 31)
- [218] LING, W. u. a.: „New composites with high thermal conductivity and low dielectric constant for microelectronic packaging“, in: *Polymer Composites* 31 (2) (2010), S. 307–313 (siehe S. 31)

- [219] LECHNER, C. und SEUME, J., Hrsg.: *Stationäre Gasturbinen*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010 (siehe S. 32)
- [220] PAAR, U. und VALLS, I.: „Werkzeugstähle und Strategie für die Warmumformung und Hartbeschneiden, Tool steels and strategy for hot forming and hard cutting“, in: *DFG ortsverteilte Forschergruppe 552, Erlanger Workshop Warmblechumformung, 2*, Bamberg: Meisenbach, 2007, S. 73–92 (siehe S. 32, 122)
- [221] *DIN EN ISO 148-1:2017-05, Metallische Werkstoffe- Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy- Teil_1: Prüfverfahren (ISO_148-1:2016); Deutsche Fassung EN_ISO_148-1:2016*, Berlin (siehe S. 38)
- [222] *DIN EN ISO 6507-1:2018-07, Metallische Werkstoffe- Härteprüfung nach Vickers- Teil_1: Prüfverfahren (ISO_6507-1:2018); Deutsche Fassung EN_ISO_6507-1:2018*, Berlin (siehe S. 38)
- [223] *DIN EN ISO 6507-2:2018-07, Metallische Werkstoffe- Härteprüfung nach Vickers- Teil_2: Überprüfung und Kalibrierung der Prüfmaschinen (ISO_6507-2:2018); Deutsche Fassung EN_ISO_6507-2:2018*, Berlin (siehe S. 38)
- [224] *DIN EN ISO 6507-3:2018-07, Metallische Werkstoffe- Härteprüfung nach Vickers- Teil_3: Kalibrierung von Härtevergleichsplatten (ISO_6507-3:2018); Deutsche Fassung EN_ISO_6507-3:2018*, Berlin (siehe S. 38)
- [225] *DIN EN ISO 6508-1:2016-12, Metallische Werkstoffe- Härteprüfung nach Rockwell- Teil_1: Prüfverfahren (ISO_6508-1:2016); Deutsche Fassung EN_ISO_6508-1:2016*, Berlin (siehe S. 38, 39)
- [226] SEBASTIAN MATTHES: „Röntgendiffraktometrie mit dem Pulstec μ -x360 Gerät - Vergleichende Untersuchungen“, Masterarbeit, Ilmenau: Technische Universität Ilmenau, 2019 (siehe S. 39)
- [227] VOLT CRAFT: *VOLT CRAFT Thermologger 309*, hrsg. von VOLT CRAFT, Lindenweg 15, D-92242 Hirschau, 2008 (siehe S. 41)
- [228] SARTORIUS MECHATRONICS: *Betriebsanleitung Sartorius YDK01: Dichtebestimmungsset*, Goettingen, 2011 (siehe S. 44)
- [229] *CES Selector: Cambridge engineering selector version 4*, Cambridge: Granta Design Ltd, 2003 (siehe S. 47, 81, 86, 126, 129, 143)
- [230] THYSEENKRUPP: *Datenblatt 75Cr1: Precision Steel*, hrsg. von THYSEENKRUPP, 2022 (siehe S. 51)
- [231] *DIN EN 10132:2022-04, Kaltband aus Stahl für eine Wärmebehandlung- Technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung EN_10132:2021*, Berlin (siehe S. 51, 144)

- [232] FRIEDR. LOHMANN GMBH WERK FÜR SPEZIAL- & EDELSTÄHLE: *Datenblatt LO-K 2379*, hrsg. von FRIEDR. LOHMANN GMBH WERK FÜR SPEZIAL- & EDELSTÄHLE (siehe S. 53)
- [233] *DIN 5144:1973-03, Drechslerbeitel*, Berlin (siehe S. 54, 61)
- [234] JÄGER, S.: *Analyse rezyklierter Schleifabfälle im Hinblick auf ausgewählte Verfahren der additiven Fertigung und der Pulvermetallurgie*, 2022 (siehe S. 78, 81, 82, 92)
- [235] EKKARD BRINKSMEIER und JOCHEN ECKEBRECHT: „Angepasste Verwertung von Schleifabfällen“, in: *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 52 (1997), S. 247–252 (siehe S. 82)
- [236] LIEDTKE, S.: „Schleifschlammentölung und Qualitätskontrolle der zurückgewonnenen Kühlschmierstoffe“, Diss., Universitätsbibliothek Braunschweig, 1999 (siehe S. 82)
- [237] SCHEPERS, A.: *Einsatzmöglichkeiten wiedergewonnener Kühlschmierstoffe und Feststoffe aus Schleifschlämmen*, 1. Auflage, Bd. 25, Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen, Aachen: Shaker, 2004 (siehe S. 82)
- [238] BRINKSMEIER, E. u. a.: „Schleifprozesse verbessern“, in: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 96 (9) (2001), S. 453–457 (siehe S. 82)
- [239] H. EIFERT u. a.: „Pulvermetallurgie von Schleifschlämmen : Schleifschlamm als mögliche neue Quelle für Metallpulver“, in: 1996 (siehe S. 82)
- [240] JÄGER, S., WEBER, S. und RÖTTGER, A.: „Potential of the Recycling of Grinding Sludge by various Powder Metallurgical Processes“, in: *Procedia CIRP* 104 (2021), S. 893–899 (siehe S. 82, 92)
- [241] HANKEL, J., JÄGER, S. und WEBER, S.: „Development of a recycling strategy for grinding sludge using supersolidus liquid phase sintering“, in: *Journal of Cleaner Production* 263 (2020), S. 121501 (siehe S. 82)
- [242] JÄGER, S. und WEBER, S.: „Upcycling strategy of grinding swarf by supersolidus liquid phase sintering“, in: *Procedia CIRP* 90 (2020), S. 546–551 (siehe S. 82, 92)
- [243] WIECZOREK, L. und KRONENBERG, P.: „Remanufacturing - Die neue Art der Produktion Der Weg zu einer Kreislaufwirtschaft Forum Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik (ISSN: 2191-1347)“, in: 34. Jahrgang (2021), S. 80–83 (siehe S. 82)
- [244] KRONENBERG, P. u. a.: „Repurpose – How to upgrade tools and save resources“, in: *Cleaner Waste Systems* 6 (2023), S. 100114 (siehe S. 82)
- [245] REUTER, M.: *Methodik der Werkstoffauswahl*, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2006 (siehe S. 83, 125)

- [246] GROSSE, A.: „Methodische Ansätze zur Werkstoffauswahl“, in: *Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal* 25 (2000), S. 29–32 (siehe S. 83)
- [247] ASHBY, M. F. und JONES, D. R. H.: „Sprödbbruch und Zähigkeit“, in: *Ingenieurwerkstoffe*, hrsg. von ASHBY, M. F. und JONES, D. R. H., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1986, S. 136–146 (siehe S. 84)
- [248] LANDES, R.: *Messerklängen und Stahl: Technologische Betrachtung von Messerschneiden*, 4. Auflage, Bad Aibling: Wieland, 2018 (siehe S. 84, 105, 235)
- [249] LÖBACH, G.: *Damaszener Stahl: Theorie und Praxis ; [Praxis-Tipps für den Schmied]*, 2. Aufl., Bad Aibling: Wieland, 2013 (siehe S. 84)
- [250] LUGER, T. u. a.: „Wertschöpfung durch Mehrfachnutzung“, in: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 103 (9) (2008), S. 602–606 (siehe S. 85)
- [251] IRREK, W. u. a.: „Ökodesign-Richtlinie Zusammenfassung“, in: () (siehe S. 85)
- [252] HELLWIG, W.: *Spanlose Fertigung: Stanzen: Grundlagen für die Produktion einfacher und komplexer Präzisions-Stanzteile*, 9., aktualisierte Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009 (siehe S. 86)
- [253] HILPERT, B. und KREIDLER, V.: „Steuerung von Laserschneidmaschinen“, in: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 84 (1) (1989), S. 28–32 (siehe S. 86, 87)
- [254] „Schneiden ohne Verschleiß und Erwärmung: Hochleistungs-Schneidetechnik mit haarfeinem Wasserstrahl“, in: *Spitzentechnik in Deutschland*, hrsg. von KÜFFNER, G., Wiesbaden: Gabler Verlag, 1987, S. 147–150 (siehe S. 86, 87)
- [255] ZHENG, H. Y. u. a.: „Quality and cost comparisons between laser and waterjet cutting“, in: *Journal of Materials Processing Technology* 62 (4) (1996), S. 294–298 (siehe S. 87)
- [256] SPADŁO, S., KRAJCARZ, D. und MŁYNARCZYK, P.: „A comparison of laser cutting and water-jet cutting“, in: *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 66 (2) (2014), S. 87–92 (siehe S. 87)
- [257] KRAJCARZ, D.: „Comparison Metal Water Jet Cutting with Laser and Plasma Cutting“, in: *Procedia Engineering* 69 (2014), S. 838–843 (siehe S. 87)
- [258] SOMMER, P.: *FEHLER VOR, WAHREND UND NACH DER WARMEBEHANDLUNG VON STAHL*, [S.l.]: Springer Vieweg, 2022 (siehe S. 88)
- [259] ROTH, S. und STAHL, A.: „Der starre Körper“, in: *Mechanik*, hrsg. von ROTH, S. und STAHL, A., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022, S. 247–275 (siehe S. 89)

- [260] AMINE, T. u. a.: „Microstructural and hardness investigation of tool steel D2 processed by laser surface melting and alloying“, in: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 73 (9-12) (2014), S. 1427–1435 (siehe S. 90)
- [261] CAMACHO-OTERO, J., BOKS, C. und PETTERSEN, I.: „Consumption in the Circular Economy: A Literature Review“, in: *Sustainability* 10 (8) (2018), S. 2758 (siehe S. 92, 98, 131)
- [262] SHEVCHENKO, T. u. a.: „Consumer behavior in the circular economy: Developing a product-centric framework“, in: *Journal of Cleaner Production* 384 (2023), S. 135568 (siehe S. 92, 98, 131)
- [263] FRERICHS, F. u. a.: „Unvermeidbare Maßänderungen durch thermische Spannungen *“, in: *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 62 (5) (2007), S. 229–235 (siehe S. 93)
- [264] JENNES, R.: „Wirtschaftlichkeitsvergleich für das Isothermglühen in kontinuierlichen und diskontinuierlichen Anlagen*“, in: *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 65 (3) (2010), S. 135–140 (siehe S. 94)
- [265] LANGMANN, R.: *Taschenbuch der Automatisierung*, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017 (siehe S. 95)
- [266] KELLENS, K. u. a.: „Energy and Resource Efficiency of Laser Cutting Processes“, in: *Physics Procedia* 56 (2014), S. 854–864 (siehe S. 99)
- [267] XU, H., HU, J. und WU, W.: „Optimization of 3D laser cutting head orientation based on the minimum energy consumption“, in: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 74 (9-12) (2014), S. 1283–1291 (siehe S. 100)
- [268] STÜDEMANN: *Entwicklung eines Verfahrens zur zahlenmäßigen Bestimmung der Schneideigenschaften von Messerklingen*, VS Verlag für Sozialwissenschaften, 1956 (siehe S. 105)
- [269] SMITHEY, D. W., KAPOOR, S. G. und DEVOR, R. E.: „A NEW MECHANISTIC MODEL FOR PREDICTING WORN TOOL CUTTING FORCES“, in: *Machining Science and Technology* 5 (1) (2001), S. 23–42 (siehe S. 106)
- [270] FARAYIBI, P. K. u. a.: „Tribological characteristics of sintered martensitic stainless steels by nano-scratch and nanoindentation tests“, in: *Wear* 512-513 (2023), S. 204547 (siehe S. 109, 119, 120)
- [271] HERBERS, H.: *DIE WERKZEUGSTHLE: Chemische Zusammensetzung, warmbehandlung und anwendungsgebiete der*, [S.l.]: Springer, 1933 (siehe S. 114)
- [272] SWAIN, S. u. a.: „A short review on cooling process using compressed cold air by vortex tube in machining“, in: *Materials Today: Proceedings* 64 (2022), S. 382–389 (siehe S. 114)

- [273] DENKENA, B. und BIERMANN, D.: „Cutting edge geometries“, in: *CIRP Annals* 63 (2) (2014), S. 631–653 (siehe S. 115)
- [274] QUINN, T.: „Review of oxidational wear“, in: *Tribology International* 16 (5) (1983), S. 257–271 (siehe S. 116)
- [275] HUANG, C.-H. und LO, H.-C.: „A Three-Dimensional Inverse Problem in Predicting the Heat Fluxes Distribution in the Cutting Tools“, in: *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications* 48 (10) (2005), S. 1009–1034 (siehe S. 118)
- [276] XU, W., GENIN, J. und DONG, Q.: „Inverse Method To Predict Temperature and Heat Flux Distribution in a Cutting Tool“, in: *Journal of Heat Transfer* 119 (3) (1997), S. 655–659 (siehe S. 118)
- [277] WILZER, J. u. a.: „Influence of Alloying Elements, Heat Treatment, and Temperature on the Thermal Conductivity of Heat Treatable Steels“, in: *steel research international* 86 (11) (2015), S. 1234–1241 (siehe S. 122)
- [278] TRITT, T. M.: *Thermal conductivity: theory, properties, and applications*, Springer Science & Business Media, 2005 (siehe S. 122)
- [279] BOISSONNET, G., BONNET, G. und PEDRAZA, F.: „Thermo-physical properties of HR3C and P92 steels at high-temperature“, in: *Journal of Materials and Applications* 8 (2) (2019), S. 59–64 (siehe S. 122)
- [280] GROSSE, A.: „Methodische Ansätze zur Werkstoffauswahl“, in: *Institut für Maschinenwesen* (2000), S. 29 (siehe S. 125)
- [281] COLLINS, J. A.: *Mechanical design of machine elements and machines: a failure prevention perspective*, 2nd, New York, United States: Wiley, 2003 (siehe S. 125)
- [282] MANGERS, J. u. a.: „Adaptive model to increase resilience for emerging supply chains within the circular economy – “Zirkelmesser” an innovative case study“, in: *Procedia CIRP* 107 (2022), S. 788–793 (siehe S. 125)
- [283] CULLEN, J. M., ALLWOOD, J. M. und BAMBACH, M. D.: „Mapping the global flow of steel: from steelmaking to end-use goods“, in: *Environmental science & technology* 46 (24) (2012), S. 13048–13055 (siehe S. 125, 130)
- [284] NAKAMURA, S. u. a.: „Quantifying Recycling and Losses of Cr and Ni in Steel Throughout Multiple Life Cycles Using MaTrace-Alloy“, in: *Environmental science & technology* 51 (17) (2017), S. 9469–9476 (siehe S. 125, 130)
- [285] NUSS, P. u. a.: „Criticality of iron and its principal alloying elements“, in: *Environmental science & technology* 48 (7) (2014), S. 4171–4177 (siehe S. 125)

- [286] GRAEDEL, T. E., RECK, B. K. und MIATTO, A.: „Alloy information helps prioritize material criticality lists“, in: *Nature communications* 13 (1) (2022), S. 150 (siehe S. 125)
- [287] TEUBLER, J. u. a.: „Critical evaluation of the material characteristics and environmental potential of laser beam melting processes for the additive manufacturing of metallic components“, in: *Journal of Cleaner Production* 237 (2019), S. 117775 (siehe S. 125)
- [288] HAGEDORN, W. u. a.: „Alloy and process design of forging steels for better environmental performance“, in: *Sustainable Materials and Technologies* 34 (2022), e00509 (siehe S. 125)
- [289] VAN GEN HASSEND, F.: *Ein Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz hochlegierter Stähle unter Berücksichtigung von Anwendungsaspekten*, 2021 (siehe S. 125)
- [290] NUSS, P. und ECKELMAN, M. J.: „Life cycle assessment of metals: a scientific synthesis“, in: *PloS one* 9 (7) (2014), e101298 (siehe S. 126)
- [291] DAS, D., DUTTA, A. K. und RAY, K. K.: „Optimization of the duration of cryogenic processing to maximize wear resistance of AISI D2 steel“, in: *Cryogenics* 49 (5) (2009), S. 176–184 (siehe S. 127)
- [292] ALBERTIN, E. u. a.: „Optimizing heat treatment and wear resistance of high chromium cast irons using computational thermodynamics“, in: *Wear* 271 (9-10) (2011), S. 1813–1818 (siehe S. 127)
- [293] INGARAO, G.: „Manufacturing strategies for efficiency in energy and resources use: The role of metal shaping processes“, in: *Journal of Cleaner Production* 142 (2017), S. 2872–2886 (siehe S. 128)
- [294] OECD, S.: „Steel Market Developments: Q2 2020“, in: (2020) (siehe S. 129)
- [295] MILFORD, R. L. u. a.: „The roles of energy and material efficiency in meeting steel industry CO2 targets“, in: *Environmental science & technology* 47 (7) (2013), S. 3455–3462 (siehe S. 129)
- [296] KRONENBERG, P. u. a.: „Intelligentes Nesting in der Kreislaufwirtschaft zur Steigerung der Ressourceneffizienz“, in: 2021, S. 673–680 (siehe S. 131)

Lebenslauf

Aufgrund datenschutzrechtlicher Bestimmungen ist dieser Inhalt ausschließlich in der gedruckten Ausgabe verfügbar.

Publikationen

Kronenberg, P., et al. "Repurpose - How to upgrade tools and save resources." *Cleaner Waste Systems* (2023): 100114. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100114>

Berger, A.; Benito, S.; Kronenberg, P.; Weber, S. Impact of Thermophysical Properties of High-Alloy Tool Steels on Their Performance in Re-Purposing Applications. *Materials* 2022, 15, 8702. DOI:10.3390/ma15238702.

Hagedorn, Wiebke & Jäger, S. & Wieczorek, Lucas & Kronenberg, Philipp & Greiff, Kathrin & Weber, S. & Röttger, Arne. (2022). More than recycling – The potential of the circular economy shown by a case study of the metal working industry. *Journal of Cleaner Production*. 134439. DOI:10.1016/j.jclepro.2022.134439.

Kronenberg, Philipp & Wieczorek, Lucas & Weber, Sebastian & Röttger, Arne. (2022). Quantification of methods used in field metallography using the example of quality assurance measures for a circular economy for high-alloy steels. *Praktische Metallographie*. 59. 296 - 316. DOI:10.1515/pm-2022-0034.

Wieczorek, Lucas & Kronenberg, Philipp. (2021). Remanufacturing - Die neue Art der Produktion Der Weg zu einer Kreislaufwirtschaft *Forum Schneidwerkzeug- und Schleiftechnik* (ISSN: 2191-1347). 34. Jahrgang. 80 - 83.

Kronenberg, Philipp & Wieck, Franz & Weber, Sebastian & Löwer, Manuel. (2021). Intelligentes Nesting in der Kreislaufwirtschaft zur Steigerung der Ressourceneffizienz. 673-680. DOI:10.25368/2021.59.

Wieck, Franz & Kronenberg, Philipp & Löwer, Manuel. (2021). MBSE-Ansatz für eine Vernetzte Stoffstrommodellierung zur Verbesserung der Partnersuche in der Kreislaufwirtschaft. 501-516. DOI:10.25368/2021.44.

Leschke, Jonas & Kronenberg, Philipp & Frank, Carolin & Weber, Sebastian. (2020). Verknüpfung von Fachwissenschaft und Fachdidaktik in der Lehramtsausbildung für technische Berufskollegs und Potenziale von Laborpraktika zur Kohärenzwahrnehmung im Studium.

Blüm, M. & Kronenberg, Philipp & Peschke, I. & Weber, Sebastian. (2018). Legieren von Cu-Basis Werkstoffen während der additiven Fertigung.